

CARACTERIZACION DE ALGUNOS SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS
VOLCANICAS EN CENTROAMERICA

Tesis de Grado de Magister Scientiae

JULIO ANIBAL FALENCIA ORTIZ

INSTITUTO INTERAMERICANO DE CIENCIAS AGRICOLAS DE LA OEA
Centro de Enseñanza e Investigación
Turrialba, Costa Rica
Agosto, 1969

CARACTERIZACION DE ALGUNOS SUELOS DERIVADOS DE CENIZAS VOLCANICAS EN
CENTROAMERICA

Tesis

Presentada al Consejo de la Escuela para Graduados como requisito par
cial para optar al grado

de

Magister Scientiae

en el

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA


APROBADA:


J.A. Martini, Ph.D.

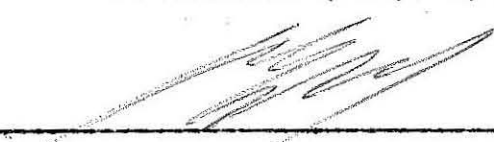
Consejero


R. Díaz-Romeu, Mag. Agr.

Comité


F. Maldonado, Ing. Agr.

Comité


A. Gorbitz, Ing. Agr.

Comité

Agosto, 1969

A mis padres

A mi esposa

A mis hijos

AGRADECIMIENTO

El autor se complace en dejar constancia de su agradecimiento a las siguientes personas e instituciones, por cuanto sin su decidida colaboración, el presente estudio no hubiera llegado a ser una realidad:

Dr. José A. Martini

Ing. Roberto Díaz-Romeu

Ing. Fausto Maldonado

Ing. Adalberto Gorbitz

Dr. Hans Trojer

Dr. Gilberto Páez

Dr. H.W. Fassbender

Dr. E. Bornemisza

Dr. W. Forsythe

Ing. Javier Becerra

Ing. René Castañeda Paz

Sr. J.J. Achoy

Sr. E. Tencio

Sr. A. Picado

Personal Técnico y Administrativo del CEI

Universidad de San Carlos de Guatemala

Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA

Universidad de Costa Rica.

BIOGRAFIA

El autor nació en la ciudad de San Antonio Suchitepequez, Guatemala, América Central, el 22 de febrero de 1933.

Realizó sus estudios de nivel medio, en la Escuela Nacional de Agricultura, graduándose de Perito Agrónomo en mayo de 1953.

Sus estudios universitarios los llevó a cabo en la Facultad de Agronomía de la Universidad de San Carlos de Guatemala, donde en diciembre de 1965, optó al título de Ingeniero Agrónomo en el grado académico de Licenciado en Ciencias Agrícolas.

Desde entonces, presta sus servicios como Jefe de Programas Experimentales en el Departamento de Investigaciones de la misma Facultad.

En septiembre de 1967 ingresó al Centro de Enseñanza e Investigación del Instituto Interamericano de Ciencias Agrícolas de la OEA, para seguir estudios de post-grado en la Disciplina de Fitotecnia y Suelos, mediante una beca concedida por IICA/Zona Norte, egresando en agosto de 1969.

CONTENIDO

	<u>Página</u>
DEDICATORIA	i
AGRADECIMIENTO	ii
BIOGRAFIA	iii
INDICE DE CUADROS	vii
INDICE DE FIGURAS	ix
1. INTRODUCCION	1
2. REVISION DE LITERATURA	2
2.1 Definición de suelos derivados de cenizas volcánicas	2
2.2 Distribución Geográfica	4
2.3 Características Principales	4
2.3.1 Características Genéticas	4
2.3.2 Características Morfológicas	7
2.3.3 Características Petrológicas	8
2.3.4 Características Mineralógicas	9
2.3.5 Características Físicas	11
2.3.6 Características Químicas	13
2.3.7 Características Microbiológicas	18
2.3.8 Características de Fertilidad	19
3. MATERIALES Y METODOS	22
3.1 Descripción General del área	22
3.2 Descripción de los sitios de Muestreo	27
3.3 Muestreo y Preparación de las Muestras	31
3.4 Metodología Analítica	32
3.4.1 Análisis Físico	32
3.4.1.1 Determinación de Humedad	32
3.4.1.2 Determinación de Color	33
3.4.1.3 Determinación Granulométrica	33

	<u>Página</u>
3.4.2 Análisis Químico	34
3.4.2.1 Determinación de pH	34
3.4.2.2 Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico (CIC)	34
3.4.2.3 Determinación de Bases Cambiables	35
3.4.2.4 Determinación de Aluminio "Extraíble"	35
3.4.2.5 Determinación de Oxidos libres de hierro	35
3.4.2.6 Determinación de Fósforo Disponible	36
3.4.2.7 Determinación de Materia Orgánica	36
3.4.2.8 Determinación de Nitrógeno total	37
3.4.2.9 Determinación de Atofana	37
3.4.3 Análisis Estadístico	39
4. RESULTADOS Y DISCUSION	40
4.1 Discusión de Resultados en General	40
4.1.1 Características de los Sitios de Muestreo	41
4.1.2 Principales Propiedades de los Suelos Estudiados..	48
4.1.2.1 Propiedades Físicas	49
4.1.2.1.1. Profundidad de los Horizontes	49
4.1.2.1.2 Color	53
4.1.2.1.3 Textura	58
4.1.2.2 Propiedades Químicas	63
4.1.2.2.1 Reacción del Suelo	63
4.1.2.2.2 Materia Orgánica	68
4.1.2.2.3 Nitrógeno Total	73
4.1.2.2.4 Relación C/N	75
4.1.2.2.5 Oxidos libres de hierro	78
4.1.2.2.6 Fósforo Disponible	81
4.1.2.2.7 Aluminio "Extraíble"	84
4.1.2.2.8 Capacidad de Intercambio Catiónico	87
4.1.2.2.9 Bases Cambiables	92
4.1.2.2.10 Porcentaje de Saturación de Bases	99
4.1.2.2.11 Atofana	104

	<u>Página</u>
4.2 Discusión de Resultados por País	107
4.2.1 Suelos de Guatemala	107
4.2.1.1 Propiedades Físicas	107
4.2.1.2 Propiedades Químicas	110
4.2.2 Suelos de El Salvador	117
4.2.2.1 Propiedades Físicas	117
4.2.2.2 Propiedades Químicas	119
4.2.3 Suelos de Nicaragua	126
4.2.3.1 Propiedades Físicas	126
4.2.3.2 Propiedades Químicas	128
4.2.4 Suelos de Costa Rica	135
4.2.4.1 Propiedades Físicas	135
4.2.4.2 Propiedades Químicas	137
4.2.5 Comparación de las propiedades entre Países	142
5. RESUMEN Y CONCLUSIONES	147
6. SUMMARY AND CONCLUSIONS	156
7. LITERATURA CITADA	163

INDICE DE CUADROS

<u>Cuadro No.</u>		<u>Página</u>
1	Principales Volcanes de Centroamérica según Weyl (60)	24
2	Características de los Sitios de Muestreo	30
3	Matriz de correlaciones entre las variables que caracterizan las condiciones climáticas, topográficas y de uso potencial de los sitios de muestreo..	44
4	Correlación entre la formación vegetal y la clasificación de uso potencial y algunas propiedades del suelo en los horizontes A, B y C	46
5	Medias y desviaciones típicas de las principales propiedades del suelo en los horizontes A, B y C	50
6	Correlaciones entre la profundidad del perfil y algunas propiedades del suelo	52
7	Correlaciones entre los componentes del color y el contenido de M.O y hierro libre	57
8	Correlaciones entre la fracción limo + arcilla y otras características	62
9	Correlaciones entre el pH determinado en H ₂ O y otras características	66
10	Correlaciones entre la M.O y otras características	70
11	Correlaciones entre el N Total y otras características	74
12	Correlaciones entre la relación C/N y otras características	77

<u>Cuadro No.</u>		<u>Página</u>
13	Correlaciones entre el Fe_2O_3 y otras características	80
14	Correlaciones entre el P disponible y otras características	82
15	Correlaciones entre el Al extraíble y otras características	86
16	Correlaciones entre la CIC y otras características	90
17	Correlaciones entre el Ca, Mg y K cambiables y otras características	96
18	Correlaciones entre el porcentaje de saturación de Bases y otras características	101
19	Contenido de alofana en cuatro de los perfiles considerados como más representativos del andosol típico	106
20	Características físicas de los suelos de Guatemala	108
21	Características químicas de los suelos de Guatemala	111
22	Características del complejo de adsorción de los suelos de Guatemala	112
23	Características físicas de los suelos de El Salvador	118
24	Características químicas de los suelos de El Salvador	120
25	Características del complejo de adsorción de los suelos de El Salvador	121
26	Características físicas de los suelos de Nicaragua	127
27	Características químicas de los suelos de Nicaragua	129

<u>Cuadro No.</u>		<u>Página</u>
28	Características del complejo de adsorción de los suelos de Nicaragua	130
29	Características físicas de los suelos de Costa Rica	136
30	Características químicas de los suelos de Costa Rica	138
31	Características del complejo de adsorción de los suelos de Costa Rica	139
32	Promedios de las principales características en el horizonte A de los suelos de cuatro países de América Central	143

INDICE DE FIGURAS

<u>Figura No.</u>		
1	Distribución geográfica de las rocas efusivas y de los principales volcanes de América Central según R. Weyl (1961), y localización de los sitios de muestreo	29
2	Distribución de frecuencias del "hue" en los horizontes A, B y C	55
3	Distribución de frecuencias de las clases texturales en los horizontes A, B y C....	60
4	Distribución de frecuencias de los rangos de pH en los horizontes A, B y C	64

1. INTRODUCCION

En América Central los suelos volcánicos se encuentran ampliamente distribuidos como consecuencia de la intensidad del vulcanismo en la región.

Cuando se advierte que estos suelos sostienen la mayor densidad demográfica dando asiento a una serie de actividades agrícolas relacionadas con la producción de cosechas básicas y de exportación, se hace más relevante su importancia como bastión de la economía centroamericana.

Sin embargo, son muy escasos los conocimientos que se tienen acerca de su naturaleza y por otro lado, es bastante fuerte la demanda de información que tienda a servir de base en los programas de desarrollo agrícola regional.

Ante tal evidencia, el presente estudio proyectado para caracterizar algunos suelos volcánicos del istmo centroamericano, pretende contribuir al mejor conocimiento de este importante grupo de suelos, pues la comprensión de su naturaleza pedogenética y de sus propiedades en general, permitirá un mejor enfoque sobre su uso y manejo y un aprovechamiento más acertado en los programas de investigación agrícola regional al hacer posible un ámbito de aplicabilidad más amplio de los resultados experimentales.

De aquí que, además de la información cuantitativa sobre las principales propiedades físicas y químicas, se presente una discusión para interpretarlas a la luz de consideraciones agronómicas y en función de sus relaciones mutuas y con respecto a los factores climáticos y topográficos que han contribuido a la formación y desarrollo de estos suelos.

2. REVISION DE LITERATURA

Aunque los suelos derivados de cenizas volcánicas se les encuentra en una amplia gama de condiciones climáticas que van desde desérticas hasta tropicales muy húmedas y frías sub-alpinas (17, 56, 67), la presente revisión bibliográfica enfoca principalmente la información sobre aquellos suelos de regiones cuyo clima varía de tropical húmedo a templado húmedo, debido a que de acuerdo con el estudio de correlación de Dudal (17) son los que muestran más alto grado de equivalencia a nivel superior en la escala de clasificación y a que son estos tipos climáticos los predominantes en la región bajo estudio.

2.1 Definición de Suelos Derivados de Cenizas Volcánicas

Ohmasa (45) considera suelos derivados de cenizas volcánicas, aquellos desarrollados sobre materiales eruptivos relativamente recientes, expulsados de cráteres, excluyendo las lavas y las tobas soldadas. Más específicamente, Birrell (6) los define como originados de partículas finas de roca, primaria o meteorizada hidrotermalmente, eruptadas de cráteres y respiraderos.

En los diferentes países donde estos suelos han sido objeto de estudio se les identifica con nombres diferentes. Así encontramos que en Japón son llamados Suelos Negros de cenizas volcánicas, Suelos húmicos de alofana, Andosoles (An - oscuro, Do - suelo), Kuroboku (kuro - negro, boku - friable) o kurotsuchi (17, 67); en Nueva Zelanda son identificados como Alvisoles o Migajones pardo amarillentos (17, 58); en Hawaii como Suelos de cenizas volcánicas o Pardo forestales, Regosoles de cenizas volcánicas, Latosoles húmicos e "Hydrol humic latosols" de acuerdo con la clasificación de Cline, según

Swindale y Sherman (56); en México como suelos de Ando (1); en Chile y Argentina como suelos Trumao, Andosoles ó Suelos Húmicos de alofana (5, 17, 67); y en Estados Unidos de Norte América como Latosoles hidroúmicos ó Andepts de acuerdo con la VII aproximación (17, 24).

En la reunión sobre clasificación y correlación de suelos derivados de cenizas volcánicas llevada a cabo en Japón durante junio de 1964 (25), el término Andosol se eligió como el más adecuado para nombrar este grupo de suelos con la siguiente definición: Suelos minerales desarrollados bajo condiciones húmedas y subhúmedas, cuya fracción activa es dominada por material amorfo en un mínimo del 50%; con gran capacidad de adsorción y absorción, alto contenido de materia orgánica y con densidad aparente y adherencia bajas; y con un horizonte A de color oscuro, friable y relativamente profundo. Pueden tener un horizonte B y no mostrar un movimiento de arcilla significativo.

Según Flach (24) la VII aproximación agrupa a ciertos suelos derivados de cenizas volcánicas en el subórden Andept si son bien drenados y en el grupo Andaquept si son hidromórficos. Sin embargo, agrega que estos suelos no han sido incluidos en estas clases principalmente por la naturaleza del material parental, sino por tener en común algunas propiedades únicas y por la gran influencia de la ceniza volcánica sobre su génesis.

De acuerdo con la VII aproximación (62), los Andepts son Inceptisoles que, a) tienen una densidad aparente menor de 0.85 g/ml ya sea en el epipedón, en el horizonte cámbico o en ambos; un complejo de intercambio dominado por material amorfo; y/o que tienen más del 60% de

cenizas volcánicas vítrias, escoria volcánica u otros materiales piroclásticos vítreos en las fracciones limo, arena, o grava; b) no se saturan con agua en ninguna estación o carecen de las características asociadas con la humedad para los Aquepts; y c) carecen de epipedón "plaggen".

2.2 Distribución Geográfica

De la definición que de estos suelos hacen Ohmasa (45) y Birrell (6), se infiere que se encuentran distribuidos alrededor del mundo en las regiones de mayor concentración y actividad volcánicas, tal como lo señalan el mismo Ohmasa (45) y Dudal (17), y en un ámbito que depende de la intensidad eruptiva, el tamaño de las partículas expulsadas y de la dirección y magnitud de los vientos predominantes (45). De acuerdo con Thornbury (59), dichas regiones volcánicas comprenden el llamado Anillo de fuego o Faja circumpacífica donde se localiza la cadena volcánica del istmo centroamericano; las áreas dispersas del Pacífico que incluyen las islas Hawaii; el Cinturón del océano Índico incluyendo Java y Sudmatra; la faja que comprende Arabia, Madagascar y los "rift valleys" en Africa; la faja mediterránea incluyendo el monte Ararat en Asia y las islas Azores y Canarias; y finalmente los volcanes de las Indias Occidentales.

2.3 Características Principales

2.3.1 Características Genéticas

Los suelos derivados de cenizas volcánicas se desarrollan a partir de un material parental constituido por fragmentos magmáticos fi-

namente triturados, expelidos violentamente y depositados en planicies o laderas suaves en condiciones climáticas húmedas o subhúmedas. De acuerdo con Takehara (34), la formación y desarrollo de estos suelos se produce por efecto de un proceso de meteorización alítica, pues la relación sílice/alúmina encontrada es mucho más baja que la de los suelos no derivados de cenizas volcánicas y el contenido de alúmina libre es alto. El mecanismo de dicho proceso de meteorización es resumido por el mismo autor en la siguiente forma:

- a) Las cenizas nuevas se muestran a menudo fuertemente ácidas debido a que contienen compuestos ácidos, pero como la lluvia lixivía fácilmente estos compuestos, inmediatamente se tornan neutros;
- b) Como la meteorización es muy rápida en una masa pulverulenta con gran área superficial, al principio se libera gran cantidad de bases y la capa lixiviada muestra reacción básica;
- c) Las bases son lavadas rápidamente debido al clima muy húmedo, pero como en el estado inicial de meteorización hay geles de sílice y alúmina, la lixiviación de los silicatos toma lugar bajo reacción básica;
- d) Al principio la sílice y la alúmina se combinan débilmente y más tarde se produce la formación gradual de la alofana; y
- e) Con el proceso de meteorización, la alofana se cristaliza gradualmente para producir haloisita hidratada o gibsita.

X El término alofana, que identifica el principal componente de la fracción coloidal de los suelos derivados de cenizas volcánicas no es-

tá claramente definido, pues mientras la mayoría lo define como cualquier mineral amorfo a los rayos X, los especialistas en minerales de arcilla prefieren definirlo como un mineral secundario coloidal hidratado, amorfo a los rayos X, con una relación sílice/alúmina entre 1 y 3, y con una gran superficie activa (55).

El proceso de formación de la alofana continúa todavía discutiéndose. Swindle (55) señala que mientras la literatura lo explica como una simple coprecipitación de sílice y alúmina, la génesis podría consistir en un proceso de hidratación del vidrio volcánico, seguido por la pérdida y difusión de bases y sílice para finalizar con la ruptura de los fragmentos de vidrio en unidades pequeñas muy hidratadas. Birrell (6) considera que el proceso consiste en la rotura de las uniones entre la sílice y otros óxidos seguida por la lixiviación de bases, mientras que Esawa (19) explica que los minerales primarios al meteorizarse forman ácido silícico e hidróxido de aluminio, los cuales coprecipitan isoelectricamente con el progreso de una desilificación y lixiviación de bases.

El producto del primer estado de meteorización de los minerales primarios es una fracción coloidal formada por sílice y alúmina amorfos muy hidratados (6, 19) y bastante estable por la acción tampón de la alúmina (6). Esta fracción que al principio es dispersa y llamada alofana B, después presenta la sílice y la alúmina con eslabonamientos entrecruzados para ser identificada como alofana A (6).

En la etapa posterior de meteorización, la alofana pierde alúmina y reorienta su sílice y alúmina restantes para formar haloisita y

luego caolinita, especialmente bajo condiciones alternantes de humedad y sequedad (6). La formación de haloisita se produce cuando la alofana pierde aluminio y gibsita, y los tetraedros de sílice aislados reaccionan con la estructura de gibsita, o cuando se produce una resili-ficación con adición de ácido silícico percolado de las capas superiores (19).

2.3.2 Características Morfológicas

En estos suelos hay una marcada diferencia entre suelo y subsuelo, aunque en este último el desarrollo del perfil es generalmente restringido (6). Según Wright (67) los perfiles pueden ser AC, A(B)C ó ABC de 50 o más de 100 centímetros de profundidad con un horizonte A muy oscuro y un B ó C de color pardo amarillento. Swindale (55) señala que en los trópicos el horizonte A es de color oscuro pero no tan intenso y que en general varía de pardo a negro azabache, mientras que el subsuelo puede variar de pardo amarillento a pardo rojizo.

La estructura en el horizonte A puede ser migajosa o granular fina y en el horizonte B es de bloques débilmente desarrollados de difícil detección en húmeda pero bien expuesta en los agrietamientos de suelos drenados y secos (67). La consistencia en húmedo es friable y de baja plasticidad y adherencia, y cuando mojado presenta una sensación grasosa al tacto (6, 67) especialmente bajo condiciones de clima muy húmedo (6).

En general son suelos de alta porosidad y gran capacidad de almacenamiento de agua (67), que presentan buen drenaje y buena aeración (5).

Los perfiles pueden mostrar, a veces, capas parcialmente cementadas a causa de procesos como el movimiento de sílice, hierro o manganeso (6), aunque Wright (67) considera que esta peculiaridad representa rasgos de deposición heredados.

2.3.3 Características Petrológicas

Según Swindale y Sherman (56) los macizos montañosos de Hawaii están formados por basalto con alguna diferenciación a nefelina, y por basalto andesítico; la actividad volcánica ha depositado mantos de ceniza que de acuerdo con su composición y ocurrencia han sido identificados como ceniza andesítica, ceniza basáltica con un contenido de vidrio púmico en fragmentos de color pardo o verde parduzco que al ser expuesto se altera a palagonita, y ceniza básica constituida por vidrio volcánico básico y ultrabásico también alterado a palagonita al menos superficialmente. En Japón (36) el material parental es principalmente de naturaleza andesítica; en Indonesia (57) son tobas andesito-dacíticas, tobas andesíticas y lahar de basalto andesítico; en Sudamérica, mientras Besoain (5) informa que en Chile el material parental es ceniza volcánica basáltica y basalto-andesítica, Wright (67) en general lo describe como magma ácido expulsado violentamente en forma de ceniza ácida rica en sílice en estado púmico y especialmente material eruptivo finamente triturado de magma ácido y básico, o bien mezcla de cenizas producidas por la erupción simultánea de varios volcanes, que da lugar a cenizas andesíticas básicas y cenizas andesíticas ácidas o dacitas; y en México según Aguilera (1), los depósitos de cenizas son de origen basáltico, andesítico y riolítico.

En Centroamérica podría establecerse que el material parental de los suelos volcánicos es de naturaleza andesítica y basáltica, ya que de acuerdo con los estudios de Weyl (66) el material efusivo de los volcanes del área es principalmente andesita y basalto.

2.3.4 Características Mineralógicas

La fracción arena contiene muchos de los minerales presentes en la generalidad de los suelos, con la adición notable de vidrio volcánico y un bajo contenido de micas (6, 55). Birrell (6) sugiere que la relación entre minerales primarios de los suelos de cenizas volcánicas y los de la roca de la cual derivan, esté de acuerdo con la secuencia de meteorización dada por Fieldes y Swindale en 1954, donde ortosilicatos, vidrio básico, piroxenos, hornblenda, feldespatos y cuarzo meteorizan con mayor facilidad en ese orden. Egawa (21) señala que en general la fracción de arena fina de estos suelos en Japón, contiene minerales livianos como cuarzo, plagioclasas, biotita, vidrio volcánico, ópalo vegetal, etc. y pesados como olivino, hiperstena, augita, hornblenda, magnetita y algunos minerales opacos; y agrega que en el vidrio volcánico se distinguen dos clases, una incolora y de composición ácida y otra de color pardo y de composición básica. En los dos grupos de minerales antes mencionados, Kano, citado por Egawa (19), señala la presencia de cuatro tipos de asociaciones de acuerdo al mineral predominante: tipo olivino, tipo vidrio y ópalo vegetal, tipo hornblenda y tipo pi-roxeno. Estas asociaciones, al afectar la morfología de los suelos, especialmente en la coloración del horizonte B, dieron lugar a clasifi-carlos en Pardos o de cenizas basálticas, Onji con capas de ceniza ví-

tea o riolítica por debajo del horizonte superficial, y pardo amarillentos o de cenizas de biotita-hornblenda andesíticas (19). Por su parte y de acuerdo con la composición de la fracción arena fina, Kobo (36) distingue cuatro categorías en estos mismos suelos: ricos en olivino, ricos en piroxenos, en piroxeno-hornblenda, y en hornblenda.

La fracción limo contiene algo de los minerales primarios además de los minerales secundarios (6), y está formada principalmente por vidrio volcánico y plagioclasas (19).

La fracción arcilla está constituida casi totalmente por minerales secundarios, con una pequeña proporción de minerales primarios. Los minerales secundarios, cuya formación es atribuida a la meteorización del vidrio volcánico presente en las cenizas (5, 19, 34, 37, 55, 67), están constituidos por una mezcla de alofana, haloisita, caolinita y gibsita con predominancia de la primera (1, 5, 36, 55).

Además de la alofana y caolines, pueden encontrarse otros minerales en la fracción arcilla, dependiendo esto del material parental o del clima. Grim, citado por Birrell (6), informa que las cenizas volcánicas con alto contenido de magnesio tienden a formar montmorillonita, mientras que las de bajo contenido forman alofana y caolinita. Según Birrell (6), Uchiyama y colaboradores encontraron montmorillonita en suelos japoneses derivados de cenizas volcánicas dacíticas. Este mismo autor y Swindale y Sherman (56) indican respectivamente, que bajo condiciones climáticas de lixiviación restringida y de baja intensidad en la meteorización, el vidrio volcánico meteoriza a palagonita, un mineral coloidal amorfo de color amarillo, pardo o anaranjado, que según

Swindale y Sherman (56) es un aluminosilicato con calcio, magnesio y potasio, producido por hidroxidación y rotura física de las partículas de vidrio. Dudal y Soepraptohardjo (18) informan de suelos caoliniticos de cenizas andesíticas encontrados en Java a bajas altitudes con clima monzónico y suelos alofánicos a altas elevaciones bajo condiciones permanentemente frías y húmedas.

Según Egawa (19), en un suelo de ceniza volcánica vítrea, Yoshinaga y Aomine separaron de la fracción arcilla un nuevo mineral llamado imogolita que consideraron producto intermedio en el proceso de cristalización de la alofana.

Egawa (19) considera que aunque a partir de los minerales primarios pueden formarse varios minerales arcillosos dependiendo de las condiciones ambientales, el vidrio volcánico y las plagioclasas son las principales fuentes de arcilla de los suelos derivados de cenizas volcánicas. Este mismo autor indica que en la composición de los minerales de arcilla de estos suelos en Japón se basa la siguiente clasificación: arcillas con abundante alofana cuando la meteorización es reciente, arcillas ricas en halpisisita hidratada observable en secuencias de cenizas relativamente viejas y enterradas, y arcillas con alofana como mineral predominante, pero con caolinita y gibsita como sucede en el horizonte B de suelos de cenizas de andesita con biotita y hornblenda.

2.3.5 Características Físicas

En comparación con los suelos no derivados de cenizas volcánicas, estos suelos tienen densidad aparente más baja y mayor porosidad y permeabilidad (36). Asociado con la baja densidad aparente, estos suelos

muestran a través de todo el perfil un contenido de humedad alto, que aun en los subsuelos es comparable con el de los suelos superficiales altamente orgánicos de los suelos derivados de otro material parental (6). Esta baja densidad aparente, Yamanaka (68) la asocia con la alta porosidad, señalando que en Japón han encontrado valores que oscilan entre 0.45 y 0.75 g/ml, los cuales pueden subir a 0.8 y 0.9g/ml cuando los suelos muestran mezcla de otro material parental. Estos valores están de acuerdo con los requisitos de la 7a. aproximación (62), que señala para los andepts una densidad aparente no mayor de 0.35 g/ml.

El hecho de que el horizonte superficial rico en material orgánico tenga una densidad aparente mayor que la del subsuelo, parece contradictorio por la estructura compacta de éste último; sin embargo, es explicable debido a su alta porosidad, pues mientras en los suelos superficiales es de 67 a 78%, en los subsuelos es de 75 a 85% (68). Respecto a esta variabilidad de la porosidad entre suelo y subsuelo, Birrell (6) al informar que la cantidad de microporos y porosidad total son altas, señala que ambas son uniformes en todo el perfil.

Otra peculiaridad de estos suelos es su gran capacidad de retención de humedad, registrándose en suelos de Japón (34) valores entre 100 a 150%. Flach (24) informa que la retención de humedad calculada en base al peso, puede ser tan alta como 150% a 15 bars y de 280% a 1/3 de bar.

La permeabilidad es alta en general, aunque decrece durante el proceso de meteorización al desarrollarse la estructura masiva (68).

De acuerdo con Birrell (6), las diferencias en el tamaño de las partículas son mucho mayores que en otros suelos; sin embargo, Swindale (55) advierte que esto no es particularmente notable en suelos con este material parental más meteorizado.

Se cree que esta particularidad está asociada con la presencia de material amorfo que dificulta una completa dispersión, debido a que tiene un punto isoelectrico más alto en comparación con las arcillas cristalinas y a que los hidróxidos inducen una coprecipitación (6, 36).

Gradwell y Birrell, citados por este último autor (6), señalan que el contenido creciente de coloides amorfos en estos suelos, tienden a disminuir los valores de los límites líquido y plástico.

2.3.6 Características Químicas

Según Kobo (36), la relación molecular $\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$ de la fracción de estos suelos que se descompone en HCl en caliente, es cercana a 1.5; según Aguilera (1) comprendida entre 1.0 y 2.5; y según Birrell (6) cercana a 2.0 cuando hay un alto contenido de caclinita, de 1.0 a 2.0 cuando predomina la alofana y de 3.0 ó más cuando hay mucha montmorillonita. Kobo (36) indica que Saki en Japón propuso la definición de suelos sialíticos para aquellos que presentan una relación Sílice/alúmina mayor de 2.0 y suelos Alíticos para los que la mostraran menor de 2.0.

Los valores de pH generalmente indican condiciones de débil a fuertemente ácidas, aunque los suelos con montmorillonita o palagonita son casi neutros (6). Birrell (6) señala que los suelos jóvenes tienden a valores de pH entre 5 y 6, y Swindale (55) indica que en ge

neral el pH es mayor de 5. Ambos autores están de acuerdo en que la razón de estos valores estriba en la alta capacidad tampón de la fracción coloidal típica de estos suelos. Según Aguilera (1) en México es los valores de pH oscilan entre 4 y 6.5 y en Chile (2) entre 4.7 y 6.2. Para suelos superficiales de Centroamérica los valores de pH varían en tre 5.2 y 7.5 (38, 43).

En los suelos superficiales se encuentra gran acumulación de hu - mus con un contenido de carbono que varía del 3 al 20% de acuerdo con el grado de meteorización (36). Según este autor, la gran acumulación de humus está relacionada con la alta capacidad de retención de hume - dad de estos suelos y especialmente con la presencia del complejo hu - mus-alofana que tiene gran capacidad de fijación de humus, pues es evi dente que la acumulación de humus disminuye a medida que la alofana se meteoriza a caolinita cuya fuerza de adsorción es menor que de la alo - fana, permitiendo entonces la liberación del humus que luego se descom pone.

Wright (67) informa que el contenido de materia orgánica en el ho - rizonte A varía de 8 a 28% con un predominio de ácidos fúlvicos, y que por efecto de la melanización intensa, dicha materia orgánica se pre - senta en formas estables. En horizontes superficiales de suelos japo - neses (34) el contenido alto de materia orgánica (7.5-29%) es atribuí - do a la abundancia del sistema radical del pasto nativo y a que el pro ceso de descomposición de la materia orgánica resulta inhibido por la gran capacidad de retención de humedad de estos suelos y por su rique - za en aluminio activo que al reaccionar con el humus, le da estabili -

dad. Aguilera (1) da valores que varían entre el 5 y el 20% para estos suelos en México, con un contenido de nitrógeno total que va del 0.2 al 0.7%. El alto contenido de materia orgánica, particularmente en los suelos superficiales, y el contenido de nitrógeno moderadamente alto, permite que la relación C/N sea alta en comparación con la de los suelos no derivados de cenizas volcánicas (6, 36). Birrell (6) informa que en los horizontes superiores de estos suelos en las tierras altas de Japón, se observa una transformación peculiar de la materia orgánica que se manifiesta con una relación C/N que inicialmente decrece con la humificación y luego aumenta cuando el nitrógeno se mineraliza y se pierde, notándose lo mismo en el perfil con el aumento de la profundidad. Los valores de C/N encontrados para estos suelos en los horizontes superiores varían de 6.6 a 23.6. Taylor (58) encontró en suelos de Nueva Zelanda valores de C/N comprendidos entre 9 y 26.

Kobo (36) señala que debido al alto contenido de humus, la capacidad de intercambio catiónico es más alta que en los suelos no derivados de cenizas volcánicas y que como esta CIC depende del humus y la alofana, con un poder de fijación de NH_4 y K muy débil en comparación con la de las arcillas cristalinas, es alta la pérdida de estos cationes por lixiviación. Mientras este mismo autor da valores para la CIC de horizontes superficiales que varían de 30 a 60 meq/100 g de suelo, en suelos de México (1) tales valores oscilan entre 15 y 60 meq/100 g de suelo y en suelos de Chile (2) entre 14.9 y 29.7 meq/100 g de suelo. Los valores encontrados en suelos volcánicos de América Central varían entre 11.5 y 45.2 meq/100 g de suelo (38, 43). De acuerdo con Wright

(67) la CIC de estos suelos en Sudamérica es moderada (20 a 40 meq.%), pudiéndose encontrar valores altos como 78 meq.% y bajos como 18 meq.%.

En las bases intercambiables predomina el calcio sobre el magnesio y éste sobre el potasio (1, 34), sin embargo los suelos de cenizas volcánicas con alto contenido de olivino son particularmente ricos en magnesio.

El calcio se lixivia fácilmente en suelos de pH muy bajo (34) y de aquí que su nivel en el complejo de intercambio baje con el carácter más ácido del material parental y con el avance de la meteorización (36). El magnesio y especialmente el potasio parecen seguir esta misma tendencia, pues la retención de cationes por los aluminosilicatos amorfos requiere un medio alcalino y dentro de la variación normal de pH de estos suelos esta condición no es posible (6).

Esto explica la variabilidad encontrada en los valores de cada uno de estos cationes intercambiables expresados en meq/100 g de suelo, pues mientras en suelos de California y Oregón estos valores varían alrededor de 6, 1.2, y 1 para Ca, Mg y K respectivamente, en Hawaii varían alrededor de 35, 7 y 6 (24). En suelos volcánicos de Centroamérica se encontraron valores que varían alrededor de 20, 6 y 3 meq/100 g de suelo (38, 43).

Los valores en el porcentaje de saturación de bases de los suelos derivados de cenizas volcánicas con caolinita o montmorillonita están de acuerdo con los valores de pH, pero no sucede así en los suelos de alofana, ya que son usualmente muy bajos aún a pHs que indican acidez débil o moderada (6, 55). Según los mismos autores, esto parece estar

relacionado con el pH a que se determina la CIC sin considerar las cargas dependientes del pH de los suelos con minerales coloidales amorfos, y de aquí que la aparente saturación de bases, medida a pH 7, sea mucho más baja que la verdadera si la determinación hubiese sido hecha al pH normal del suelo.

La saturación de bases de estos suelos también varía ampliamente, pues se encuentran valores desde 2 a 30% en suelos de Nueva Zelanda (58), de 13 a 19% en suelos de Estados Unidos de América (24) y de 25 a 50% en suelos de Chile (2), hasta valores de 15 a 73% en suelos de América Central (38, 43), y de 60 a 80% en suelos de Hawaii (24).

El contenido de alofana en estos suelos parece depender del grado de avance del proceso de meteorización y de la frecuencia e intensidad en que se produzcan nuevas deposiciones de ceniza volcánica. En suelos de Nueva Zelanda se encontraron contenidos de alofana que variaron entre 30 y 100% (58) y en suelos volcánicos de Panamá, Martini (38) encontró valores comprendidos entre 7.6 y 28%.

Estos suelos tienen una alta capacidad de fijación de fosfatos, molibdatos y sulfatos (6, 36, 55). Mientras Swindale (55) señala que al tenor del conocimiento actual, la formación de taranaquita explica la propiedad de fijar fosfatos, Birrell (6) y Kobo (36) sugieren que esta es debida a la actividad de la alúmina en relación con su capacidad tampón y su reactividad con aniones presentes en gran concentración para formar compuestos de aluminio reconocibles. La fijación es alta en la variación normal de pH de estos suelos (6), pero según Kobo (36) depende también de la cantidad y clase de arcilla presente, pues crece

a medida que avanza la meteorización y decrece cuando en etapas posteriores la alofana meteoriza a minerales del tipo 1:1. Este comportamiento explica la grave deficiencia de fósforo en suelos volcánicos de Centroamérica (22), pues los valores encontrados, aplicando el método de Bray y Kurtz, variaron entre 0.6 y 9.3 ppm de P disponible (4).

En general los elementos menores se encuentran en cantidades suficientes, posiblemente debido a la rápida y simultánea meteorización de la gran variedad de minerales primarios (6), sin embargo, Askew et. al. citados por Birrell (6) informan de la deficiencia problemática de cobalto en suelos derivados de pomez riolítica de Nueva Zelanda, y así mismo Hartley et. al., citados por el mismo autor, informan de la necesidad de suministrar selenio suplementario a ovejas que pastaron en suelos similares.

2.3.7 Características Microbiológicas

Al contrario de lo que sucede en la generalidad de los suelos, la población de actinomicetos y de bacterias anaeróbicas es más abundante en los suelos derivados de cenizas volcánicas de Japón (31, 36); sin embargo, Ishizawa (31) advierte que aunque la cantidad de actinomicetos es mayor, no siempre es más grande su actividad.

Se considera que estas características microbiológicas son inducidas por las propiedades físicas de estos suelos, especialmente la estructura, pues sugieren que mantienen condiciones biológicamente secas y aeróbicas (31).

En cuanto a la actividad microbiológica, la nitrificación y la actividad de ureasa son generalmente más intensas que en los suelos no

derivados de cenizas volcánicas (31, 36).

2.3.8 Características de Fertilidad

Debido a la predominancia de arcilla amorfa en la fracción activa de estos suelos, sus propiedades físicas y químicas son muy peculiares y dan lugar a una serie de problemas relacionados con su manejo y conservación (6, 58). Sin embargo Tan (57) sostiene que el comportamiento de estos suelos debe ser atribuido también a su alto contenido de materia orgánica, puesto que la fracción activa es un complejo coloidal organo-mineral.

En general son relativamente fértiles (37, 57) pero a menos que hayan nuevas deposiciones de material parental, esta fertilidad resulta disminuida, pues según Jackson (33), el alto contenido de alofana propicia una estructura porosa estable que eleva los índices de permeabilidad y predispone al suelo a sufrir pérdidas exhaustivas por lixiviación.

La estabilidad del humus relacionada con la alta capacidad de retención de humedad de estos suelos y con la reactividad de su fracción coloidal amorfa, y la lixiviación del NH_4 por la alta permeabilidad del suelo y la deficiente capacidad de la alofana para retenerlo, hacen necesaria la aplicación de grandes cantidades de fertilizante nitrogenado (6, 36, 58).

Es necesaria también la aplicación de fertilizante fosfatado debido a la gran capacidad de estos suelos para fijar fosfatos (1, 6, 36, 55), la cual es atribuida a la presencia de alúmina relacionada con su reactividad y su capacidad tampón (6, 36), a la participación

de gran proporción de fertilizante aplicado en la formación de taranquita y a la formación de complejos insolubles con el humus del suelo (58).

La presencia de humus, sin embargo, favorece la respuesta a las aplicaciones posteriores de fertilizante fosfatado, pues cuando el humus recubre íntimamente los minerales amorfos, éstos resultan disminuídos en su reactividad para la fijación de fosfatos (58).

Como la retención de cationes por los alumino-silicatos amorfos requiere un medio alcalino y dentro de la variación normal de pH de estos suelos no hay mecanismo para una conveniente retención de potasio, se requiere frecuentes abonaduras con este elemento, especialmente cuando su liberación por meteorización de feldspatos no está de acuerdo con la demanda de las plantas (6).

Las necesidades de cal, estimadas en base al porcentaje de saturación de bases, no se ajusta a la realidad debido a que la CIC es sólo aparente por causa de las cargas dependientes del pH que son altas en suelos con gran contenido de coloides amorfos, a menos que tengan una acidez cambiante de mediana a alta (6).

Los valores de K intercambiable (0.15-2.15 meq./100 g de suelo) encontrados en algunos suelos volcánicos de Costa Rica, se relacionaron con el contenido de K total de la planta, lo cual parece sugerir que el K intercambiable determinado con NH_4OAc neutro, normal, es un índice adecuado de la disponibilidad de potasio en el suelo (54).

En cuanto a los niveles y balance de los nutrimentos del suelo, Hardy (28) estableció provisionalmente para algunos suelos volcánicos

de Costa Rica dedicados a cacao y café, los siguientes patrones como límites adecuados: pH 6.5; Calcio, 12 meq/100 g de suelo; Magnesio, 3 meq/100 g de suelo; Potasio, 0.35 meq/100 g de suelo; Nitrógeno total 0.20%. $Ca/Mg = 4$, $Ca/K = 35$, $Mg/K = 8$ y $Ca\ Mg/K = 40$.

3. MATERIALES Y METODOS

3.1 Descripción General del Area

El istmo centroamericano, localizado en el trópico del hemisferio norte, se extiende de noroeste a sudeste desde México hasta Panamá entre los 8 y 18 grados de latitud norte y entre los 83 y 92 grados de longitud oeste. Comprende las repúblicas de Guatemala, El Salvador, Honduras, Nicaragua y Costa Rica, con una superficie total de 463.937 kilómetros cuadrados y una población de cerca de 12 millones de habitantes (14) que se incrementa con una tasa anual del 3.4% (3).

Un sistema orogénico que atravieza longitudinalmente toda la región con ramificaciones en el interior de cada uno de los países, ofrece un paisaje montañoso y volcánico caracterizado por vertientes hacia el golfo de México en la parte más septentrional y hacia el Atlántico y el Pacífico en el resto del territorio, con planicies costeras, valles intermontanos y picos volcánicos que se alzan hasta más de 4.000 metros sobre el nivel del mar. Estos picos forman una larga cadena de volcanes, cuya actividad a través del tiempo unida a la acción de fenómenos tectónicos, ha influenciado las condiciones geológicas y pedológicas del área.

En este relieve toman lugar complejos climáticos, ecológicos, geológicos y pedológicos de gran variabilidad.

El clima varía de acuerdo con la latitud, altitud, dirección de los vientos predominantes, y la ubicación del lugar con respecto a la orientación del macizo montañoso (61), y según el sistema de Köppen

pertenece a los tipos Af, Am, As, Aw, Cf y Cw con los tipos C en relación a la altitud, y con mayor precipitación en la costa del Atlántico que en la del Pacífico (63).

La variación ecológica es tipificada por Holdridge (30) en distintas formaciones vegetales que van desde manglares, sabanas, bosques secos y bosques húmedos, hasta bosques premontanos y montanos y los bosques subalpinos y páramos en las cimas y picos volcánicos.

La geología centroamericana, relativamente reciente, consiste en gran parte de formaciones ígneas, volcánicas y sedimentarias que datan en su mayoría del cuaternario y el terciario (40).

De acuerdo con Wevl (66), Centroamérica, se divide en seis unidades geológicas, las cuales difieren entre sí por su génesis y estructura y se identifican como la Península de Yucatán, las Cordilleras de Centroamérica septentrional, Centroamérica meridional, la región volcánica de Centroamérica, las planicies costeras y las tierras bajas, y los mares epicontinentales.

Este mismo autor indica que el plutonismo en Centroamérica meridional, donde las rocas más antiguas son los complejos de "Panamá" y "Nicoya" formados principalmente de volcanitas básicas, es más o menos contemporáneo con la erupción magmática de enormes mantos efusivos ocurrida en Nicaragua, Honduras, El Salvador y sur de Guatemala. Este material eruptivo abarca todos los tipos de roca desde riolita hasta basalto olivínico y son especialmente abundantes las ignimbritas y las tobas ricas en sílice. Finalmente agrega que el vulcanismo cuaternario y reciente se halla concentrado en la zona marginal del Pacífico,

donde se ubica la cadena de volcanes a cuyo pie se extiende hacia la costa una llanura aluvial más o menos ancha formada de material volcánico de acarreo compuesto de minerales de rocas piroclásticas ácidas y lavas básicas, con sus intermedios.

En el cuadro 1 se presenta información, tomada de Weyl (66), sobre los principales volcanes de América Central, su condición de actividad y el componente petrológico del material efusivo.

Cuadro 1: Principales volcanes de Centroamérica, según Weyl (1961)

<u>Nombre</u>	<u>Material Efusivo</u>	<u>Actividad</u>
<u>Guatemala:</u>		
Tacaná	Andesita	Fumarolas
Tajumulco	Andesita	Fumarolas
Santa María	Andesita, Riodacita y Dacita	Act.1902, Fumarol.
Cerro Quemado	Andesita, Dacita	Act.1785, Fumarol.
Zunil	Basalto	Sulfataras
Atitlán	Andesita	Act.1856, Fumarol.
Tolimán	Andesita	Fumarolas
Fuego	Andesita	Act. 1957
Acatenango	Andesita	Semiactivo
Agua	Andesita	Inactivo
Pacaya	And., Basalto, Dacita, Riolita	Act.1846, Fum.
Tecuamburro	Andesita	Fumarolas
Moyuta	Andesita	Fum. y Sulfataras
<u>El Salvador</u>		
Laguna Verde	Andesita	Fumarolas
Santa Ana	Basalto, Andesita	Act.1904, 1960 Fum.
Izalco	Basalto, Basalto olivínico	Activo
San Marcelino	Andesita, Basalto	Activo
San Salvador	Basalto, Andesita	Activo 1917
San Vicente	Andesita	Fumarolas
Tecapa	Basalto, Basalto olivínico	Sulf. y Fumarolas
Chinameca	Andesita	Sulf. y Fumarolas
San Miguel	Basalto olivínico	Activo

<u>Nombre</u>	<u>Material Efusivo</u>	<u>Actividad</u>
<u>Nicaragua</u>		
Cosigüina	Basalto, Andesita	Activo 1835
El Viejo	Basalto	Activo 1865
Telica	Basalto, Basalto olivínico	Activo 1865
Santa Clara	Basalto olivínico, Andesita	Activo
Cerro Negro	Basalto olivínico	Act.1950, Sulfat.
Las Pilas	Basalto	Act.1954,1957,Fum.
Momotombo	Basalto	Act. 1905
Masaya	Basalto	Act. 1946
Concepción	Basalto	Act. 1957
<u>Costa Rica</u>		
Rincón de la Vieja	Andesita	Act. 1863, Fumarol.
Tenorio	Andesita	Fumarolas
Poás	Andesita	Activo, Fumarolas
Barba	Basalto olivínico, Andesita	Act. 1867
Irazú	Basalto, Andesita	Activo 1920
Turrialba	Basalto, Andesita	Activo 1866, Fum.

Ultimamente se han registrado erupciones como la del volcán Fuego (1966) y la del Pacaya (1967) en Guatemala, la del volcán Cerro Negro (1968) en Nicaragua, y la del volcán Arenal (1968); este último no incluido en la lista anterior.

El complejo pedológico ha sido estudiado total o parcialmente a nivel de reconocimiento (16, 21, 52, 64) y con base en esta información la FAO (63) elaboró una primera aproximación del mapa de suelos de Centroamérica a nivel de gran grupo. En este mapa se informa de la existencia de fluvisoles, regosoles, glevisoles, rendzinas, andosoles, vertisoles, brunizems, halosoles, cambisoles, luvisoles, rubrozems, rodosoles y litosoles.

A pesar de la gran variabilidad atribuida a los suelos del trópico, Martini (40) señala que en el istmo centroamericano se observa la

predominancia de cuatro grandes grupos, ya sea por su extensión o su valor agrícola, los cuales pueden ser localizados en 5 áreas pedológicas: a) las Planicies del Pacífico con estaciones secas definidas y altamente cultivadas, donde los suelos predominantes son aluviales, aluvio-volcánicos, planosoles, grumusoles y latosoles; b) las Laderas del Pacífico, también con estación seca definida y relativamente bien cultivada, donde abundan las superficies erosionadas y pedregosas y los suelos predominantes son los litosoles, andosoles, pardo-forestales y latosoles; c) los Altiplanos con estaciones secas definidas y cultivadas intensamente, donde los suelos principales son los regosoles, sobre cenizas volcánicas, andosoles, aluvio o lacustro-volcánicos y los brunizems; d) las Laderas del Atlántico, sin estación seca definida, frecuentemente bien provista de vegetación arbórea y en donde los suelos dominantes son los pardo-forestales y los latosoles; y e) las Planicies del Atlántico, también sin estación seca definida y poco cultivadas, donde los principales suelos son aluviales, planosoles, grumusoles y otros suelos arcillosos de drenaje limitado y con pH alcalino cuando derivan de rocas calizas.

El mapa sobre uso potencial de la tierra del istmo centroamericano elaborado por Plath y Van der Sluis (46), registra para la región una superficie total de 423,111 kilómetros cuadrados dedicado a la agricultura actual y potencial, y dividida en cuatro categorías de acuerdo a su capacidad de uso. Estas categorías van desde las de uso intensivo y extensivo para cultivos anuales y perennes que cubran una superficie de 167,362.4 Km. cuadrados, hasta las de uso forestal y de

uso muy extensivo con una superficie de 331,648.6 kilómetros cuadrados. De esta superficie corresponde a Guatemala un total de 3,720,800 hectáreas, a El Salvador 1.530.000 hectáreas, a Honduras 2.507.400 hectáreas, a Nicaragua 2.372.000 hectáreas y a Costa Rica 1.800.000 hectáreas (3). Babbar (3) y Martini (41) señalan que los países centroamericanos al caracterizarse por una marcada similitud respecto a los factores naturales como suelo, clima, altitud, etc., muestran una gran uniformidad en los renglones de su producción agrícola, y de aquí que se encuentren maíz, frijol, arroz, caña de azúcar y sorgo como productos básicos, y café, algodón, banano, cacao y ganado vacuno como principales renglones agrícolas de exportación.

32. Descripción de los Sitios de Muestreo

Como se ilustra en la figura 1, los sitios de muestreo están localizados a lo largo de la carretera interamericana y de caminos vecinales que, justamente, atraviesan el área donde predomina el grupo de suelos objeto del presente estudio.

En el cuadro 2 se describe la ubicación de estos sitios mediante la distancia a las poblaciones más cercanas y se incluye información sobre la altitud y topografía correspondientes, siguiendo un ordenamiento por país y de mayor a menor altitud sobre el nivel del mar. En Guatemala la altitud varía de 300 a 3000 metros, en El Salvador de 60 a 900 metros, en Nicaragua de 100 a 300 metros y en Costa Rica de 150 a 2400 metros. La topografía también es variable, pues las muestras se recolectaron desde planicies con pendientes de 1 al 2% hasta áreas

montañosas con laderas de 10 a 20% de desnivel.

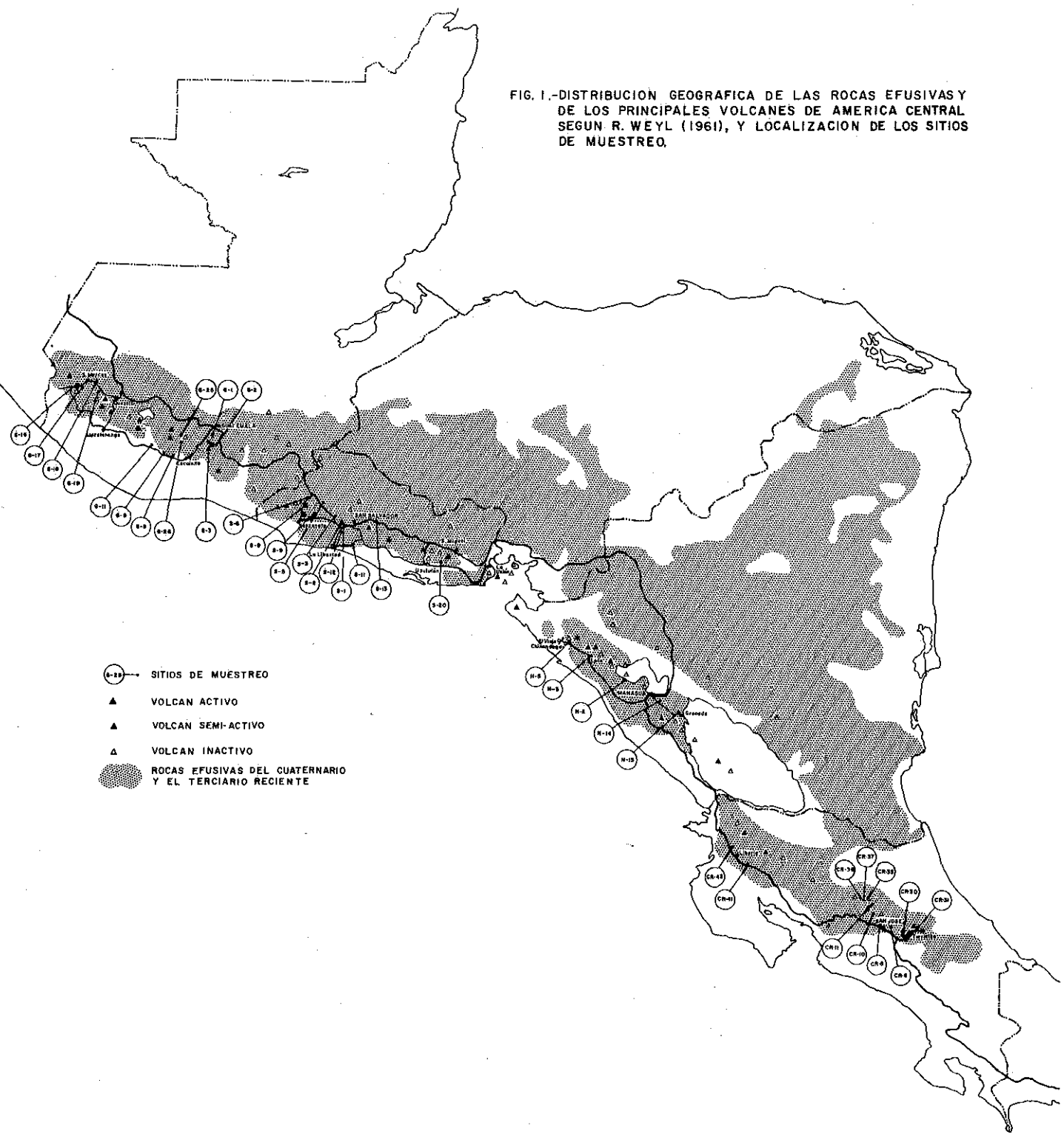
En el cuadro 2 se complementa la descripción de los sitios muestreados con información sobre pluviosidad, temperatura, uso actual y potencial de la tierra, formación vegetal, formación geológica, material parental, grado de desarrollo del suelo y serie.

De acuerdo con el mapa climático de América Central, elaborado por Tröjer y Jaramillo (60), la pluviosidad de cada sitio de muestreo expresada en metros de precipitación media anual, va de 1 a 4 metros, encontrándose la menor variación en El Salvador y Nicaragua (1 a 2 metros) y la mayor en Guatemala y Costa Rica (1 a 4 metros). En general, la temperatura que fue estimada de acuerdo con gradientes (dt/dh) de 0.6 a 0.9 grados centígrados por cada 100 metros de diferencia con respecto a un punto cercano de altitud y temperatura conocidas, varía de 9 a 27.3 grados centígrados en relación con la altitud y ubicación del sitio de muestreo.

Según el mapa de uso potencial de la tierra de Plath y van der Sluis (46), los sitios de muestreo se localizan en algunas subdivisiones de las cuatro categorías señaladas, a saber:

- IA-CS: Uso intensivo para cultivos anuales en clima caliente-seco.
- IA-TS: Uso intensivo para cultivos anuales en clima templado-seco.
- IP-TS: Uso intensivo para cultivos perennes de clima templado-seco.
- IIP-CH: Uso extensivo para cultivos perennes de clima caliente-húmedo.
- IIID: Uso forestal con maderas duras tropicales.
- IIIPi: Uso forestal con masas puras de coníferas.

FIG. 1.-DISTRIBUCION GEOGRAFICA DE LAS ROCAS EFUSIVAS Y DE LOS PRINCIPALES VOLCANES DE AMERICA CENTRAL SEGUN R. WEYL (1961), Y LOCALIZACION DE LOS SITIOS DE MUESTREO.



CUADRO 2. Descripción de los sitios de muestreo

Perfil	Localización	Altitud m.s.n.m.	Temp- ratur. °C	Pred- piti- v. Anual	Meses Secos	Decliv- ve %	Formación Vegetal ^{1/}	Formación Geológica ^{2/}	Material Parental	Grado de Desarrollo	Serie ^{4/}
G-19	Entre Palestina y San Juan Ostuncalco	3000	9.0	2.0	5	10	Bosq. Hm. Montano	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Pomacea	Moderado	Camanchá
G-18	Entre Palestina y San Juan Ostuncalco	2800	10.2	2.8	4	10	Bosq. Hm. Montano	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Pomacea	Moderado	Ostuncalco
G-17	Entre San Raf. Pie de la Cuesta y S. Marcos	2600	11.3	2.2	4	10	Bosq. M. Hm. Premont.	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Pomacea	Moderado	Ostuncalco
G-16	Entre San Raf. Pie de la Cuesta y S. Marcos	1800	16.2	3.0	4	20	Bosq. M. Hm. Premont.	Roca Volc. Cuatern.	Escoria máfica	Moderado	Alotenango
G-25	Verdad Duedas, Ciudad Vieja	1500	18.7	1.0	6	4	Bosq. Seco Premontano	Roca Volc. Cuatern.	Escoria máfica	Moderado	Alotenango
G-26	Entre Ciudad Vieja y Alotenango	1400	19.8	1.2	5	5	Bosq. Seco Premontano	Roca Volc. Cuatern.	Escoria máfica	Débil	Alotenango
G-1	Km 15 Guatemala-Morán	1400	19.0	2.0	5	3	Bosq. Hm. Mont. Bajo	Roca Volc. Cuatern.	Pomez Cementada	Moderado	Guatemala
G-2	Vecindad Ing. Sta. Teresa, Morán	1400	19.0	2.0	5	3	Bosq. Hm. Mont. Bajo	Roca Volc. Cuatern.	Pomez. Cem. débil	Moderado	Morán
G-9	Km 87 Escuintla-Mazatenango	500	24.0	3.5	4	3	Bosq. Hm. Tropical	Aluvión Cuaternario	Lahar Fed. máfico	Moderado	Parán
G-11	Km. 101 Escuintla-Mazatenango	400	24.3	3.0	4	2	Bosq. Hm. Tropical	Aluvión Cuaternario	Ceniza Pomacea	Moderado	Camantulul
G-8	Km. 77 Escuintla-Mazatenango	300	25.8	2.7	4	3	Bosq. Hm. Tropical	Aluvión Cuaternario	Ceniza Pomacea	Débil	Camantulul
ES-1	Km. 14 San Salvador-Santa Ana	900	21.5	1.9	5	3	Bosq. Hm. Premontano	Gen. ácido Reciente	Ceniza Pomacea	Moderado	Sya
ES-2	Km. 16 San Salvador-Santa Ana	900	21.5	1.9	5	3	Bosq. Hm. Premontano	Dep. Volc. Reciente	Ceniza Pomacea	Moderado	Chif
ES-6	Km. 73 Santa Ana-Sonsontate	800	22.4	1.9	5	3	Bosq. Hm. Premontano	Dep. Volc. Reciente	Ceniza Pomacea	Moderado	Sab
ES-8	Km. 90 Santa Ana-Sonsontate	800	22.1	2.3	5	3	Bosq. Hm. Premontano	Dep. Volc. Reciente	Ceniza Pomacea	Moderado	Aza
ES-5	Km. 45 San Salvador-Santa Ana	700	22.8	1.8	5	5	Bosq. Hm. Premontano	Roc. Volc. Y Dep. Pleist.	Ceniza Pomacea	Fuerte	Api
ES-12	Km. 26 San Salvador-La Libertad	700	22.8	1.9	5	5	Bosq. Hm. Premontano	Roc. Volc. Reciente	Ceniza Pomacea	Moderado	Api
ES-13	Km. 27 San Salvador-Cajutepeque	700	22.8	1.9	5	4	Bosq. Hm. Premontano	Gen. ácido Reciente	Ceniza Pomacea	Débil	Api
ES-9	Km. 48 San Salvador-Sonsontate	600	23.1	1.9	5	3	Bosq. Hm. Premontano	Gen. ácido Reciente	Ceniza Pomacea	Moderado	Chic
ES-3	Km. 29 San Salvador-Santa Ana	500	23.8	1.6	5	3	Bosq. Hm. Premontano	Dep. Volc. Reciente	Aluvión Pirocl.	Moderado	Chic
ES-20	Km. 118 Comalapa-La Unión	140	26.6	2.0	6	2	Bosq. Seco Tropical	Dep. Volc. Reciente	Ceniza Pomacea	Moderado	Baa
ES-11	Km. 48 Comalapa-La Libertad	60	27.3	1.7	6	2	Bosq. Seco Tropical	Roc. Volc. Y Dep. Pleist.	Ceniza Pomacea	Débil	Iif
N-14	Km. 15 Managua-Granada	300	24.0	1.3	6	4	Bosq. Seco Tropical	Roca Volc. Cuatern.	Escoria máfica	Moderado	Equipulas*
N-3	Km. 97 Leba-Chinandega	200	24.0	1.9	6	2	Bosq. Seco Tropical	Roca Volc. Cuatern.	Escoria máfica	Moderado	León X
N-2	Entre Mateare y Nagarote	100	24.4	1.0	6	2	Bosq. Seco Tropical	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Pomacea	Moderado	Mateare*
N-5	Entre Chinandega y El Viejo	100	24.4	2.0	6	2	Bosq. Seco Tropical	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Chinandega*
N-15	Km. 43 Managua-Granada	160	26.0	1.5	6	4	Bosq. Seco Tropical	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Pomacea	Fuerte	Granada*
CR-36	A 1 Km. cráter Volcán Poás	2400	13.5	2.7	4	7	Bosq. M. Hm. Montano	Roca Volc. C y T	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Ar. Poasito
CR-37	Entre Vara Blanca y Volcán Poás	2100	15.4	2.5	4	7	Bosq. M. Hm. Mont. Bajo	Roca Volc. C y T	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Ar. Poasito
CR-25	1 Km. al norte de Vara Blanca	1900	16.5	3.0	4	7	Bosq. M. Hm. Mont. Bajo	Roca Volc. C y T	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Ar. Poasito
CR-6	8 Km. al este de Sh. Isidro Coronado	1800	17.2	2.5	4	10	Bosq. M. Hm. Premont.	Roca Volc. C y T	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Coronado
CR-1	Carrizal de Alajuela	1600	17.9	3.0	4	15	Bosq. M. Hm. Montano	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Ar. Poasito
CR-10	A 3 Km. de Carvajales hacia Cartago	1300	19.7	2.0	5	7	Bosq. Hm. Premontano	Roca Volc. C y T	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Cervantes
CR-51	A 2 Km. de Paraiso hacia Turrialba	1300	19.7	1.8	5	7	Bosq. Hm. Premontano	Roca Volc. C y T	Ceniza Volc. Gris	Fuerte	Heredia
CR-10	5 Km. al norte de Barba	1000	19.9	2.0	5	7	Bosq. Hm. Premontano	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Heredia
CR-8	1 Km. al sur de Sto. Domingo, Heredia	1100	21.1	2.0	5	2	Bosq. Hm. Premontano	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Volc. Gris	Moderado	Heredia
CR-41	Entre Bagaces y Liberia	150	27.2	1.7	2	2	Bosq. Seco Tropical	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Volc. Blanc.	Moderado	-
CR-42	15 Km. de Liberia hacia Peñas Blancas	150	27.0	1.5	2	2	Bosq. Seco Tropical	Roca Volc. Cuatern.	Ceniza Volc. Blanc.	Moderado	-

* Comunicación personal del Ing. E. Elizaco

1/ (30)

2/ (46)

3/ (29)

4/ (16, 21, 52, 64)

Mientras los sitios de muestreo de mayor altitud en Guatemala y Costa Rica se localizan, respectivamente, en las categorías IIIPI y IIID, en El Salvador y Nicaragua la totalidad se ubicó en las categorías IA y IP.

En base al estudio de Holdridge (30) sobre las formaciones vegetales de cada uno de los países de Centro América, los sitios de muestreo se localizaron principalmente en formaciones de Bosque húmedo premontano, Bosque seco tropical, Bosque húmedo montano bajo y Bosque húmedo tropical.

La formación geológica correspondiente a cada sitio de muestreo fue identificada de acuerdo con los mapas geológicos de Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica, los cuales aparecen como anexo del Fascicule 2 a, Amerique Centrale de Lexique Stratigraphique International (29).

Como se muestra en el cuadro 2 y en la figura 1 donde Weyl (66) señala en forma general el área cubierta por material efusivo, la mayoría de las muestras corresponden a perfiles localizados sobre material volcánico del cuaternario y reciente. De acuerdo con Simmons (51) los perfiles localizados en Guatemala sobre aluviones del cuaternario, corresponden a suelos desarrollados sobre material fluvio-volcánico reciente a elevaciones medianas.

3.3 Muestreo y Preparación de las muestras

Tanto para el muestreo como para la preparación de las muestras, se siguieron las indicaciones de Cline (12).

Los sitios de muestreo fueron localizados en áreas que se conside

raron representativas del tipo de suelo objeto de estudio. Una vez localizados, se procedió a la apertura de calicatas hasta una profundidad que permitiera reconocer el material parental. Las diferencias evidentes entre capas, basadas principalmente en el color, la textura y la estructura, dieron lugar a la delimitación de los horizontes a través del perfil y a medir su espesor. De la parte intermedia de cada horizonte se recolectaron aproximadamente 5 kg de suelo y se envasaron en bolsas de tejido de algodón para ser transportadas al laboratorio, debidamente rotuladas con su identificación correspondiente.

Las muestras de suelo de cada uno de los perfiles, fueron secadas al medio ambiente del laboratorio, luego se trituraron con un rodillo de madera, se hicieron pasar por un tamiz con abertura de 2 mm (ASTM No. 10) y se homogeneizaron haciendo uso de una mezcladora tipo "Twin Shell dry Blender" durante 20 minutos.

Una vez tamizada y homogeneizada, cada una de las muestras fue envasada en frascos de vidrio con cerradura hermética, debidamente identificada, para obtener de ahí las submuestras necesarias para todas las determinaciones analíticas que fueron hechas en duplicado.

3.4 Metodología Analítica

3.4.1 Análisis Físico

3.4.1.1 Determinación de Humedad

Para poder calcular los resultados en base al peso de suelo secado al horno, tanto del análisis granulométrico como de las determinaciones químicas, se determinó el porcentaje de humedad, a partir de submuestras de 20 g de suelo secado al aire sometidas a 105-110 grados

centígrados durante 24 horas.

3.4.1.2 Determinación de Color

El color de los suelos fue determinado usando la escala de la carta de colores de suelos de Munsell (44). Esta determinación se efectuó tanto en suelo seco al aire como en suelo húmedo.

3.4.1.3 Determinación Granulométrica

El análisis de la distribución del tamaño de partículas del suelo se llevó a cabo de acuerdo con el método combinado de tamices e hidrómetro propuesto por Day (13) y discutido por Forsythe (26), en submuestras de suelo secado al aire y tamizado a 2mm. El hidrómetro utilizado fue del tipo ASTM No. 152H con la escala de Bouyoucos en gramos por litro y las lecturas fueron hechas a 0.5, 1, 4, 9, 36, 100, 196 y 484 minutos. Los tamices usados fueron de 1000, 500, 105 y 44 micras de abertura.

Los valores del diámetro de partícula calculados a partir del valor θ correspondiente a cada lectura hidrométrica y sus respectivos porcentajes acumulativos, fueron graficados en papel semilogarítmico de tres ciclos. Las curvas trazadas así permitieron obtener, por inter-polación, el porcentaje correspondiente a cada uno de los diámetros de partícula requeridos por la escala de clasificación de texturas propuesto por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Améri-ca (11).

3.4.2 Análisis Químico

3.4.2.1 Determinación de pH

En la determinación del pH se siguió la técnica de Greweling y Peech (27) con suelo seco al aire y tamizado a 2mm. en suspensión acuosa en la proporción de 1:1 y en cloruro de calcio 0.01M en la proporción 2:1. Después de agitar las suspensiones varias veces durante los primeros 30 minutos y dejar en reposo durante 60 y 30 minutos respectivamente, se utilizó un potenciómetro Beckman con electrodos de vidrio para efectuar las mediciones de pH.

Se usaron ambos métodos con fines comparativos, ya que aunque las determinaciones de pH rutinarias se hacen comunmente en agua, Greweling y Peech (27) advierten que el método de medición de pH en cloruro de calcio 0.01M propuesto por Schofield y Taylor (50), tiene la ventaja de dar valores más reales, por cuanto minimiza el efecto errático de la dilución, de concentración de sales y del potencial de contacto.

3.4.2.2 Determinación de la Capacidad de Intercambio Catiónico

Para determinar la capacidad de intercambio catiónico se usó el método de Bower, et. al (8) modificado por Díaz-Romeu y Balerdi (15). El procedimiento seguido consistió en el tratamiento de la masa de suelo con acetato de amonio 1N, pH 7, para saturar con el catión amonio las cargas negativas del complejo de intercambio del suelo; el lavado del suelo con etanol de 95% para eliminar el exceso de acetato de amonio; el tratamiento posterior con una solución de cloruro de potasio al 10% y a pH 2,5 para desplazar todo el amonio absorbido; y finalmente la recuperación de este amonio mediante destilación en un aparato semi-micro Kjeldahl. //

3.4.2.3 Determinación de Bases Cambiables

Las bases cambiables calcio, magnesio y potasio, fueron extraídas siguiendo el método modificado de Díaz-Romeu y Balerdi (15), a partir del tratamiento del suelo con acetato de amonio neutro normal seguido en el procedimiento para la determinación de la capacidad de intercambio catiónico. La determinación cuantitativa de estos cationes se hizo con alícuotas de 2 ml de extracto diluidos a 50 ml con agua destilada, en un espectrofotómetro de absorción atómica Perkin-Elmer modelo 303, usando longitudes de onda de 212, 285 y 383 μ para el Ca, Mg y K respectivamente. //

3.4.2.4 Determinación de Aluminio Extraíble

La determinación del Al extraíble se llevó a cabo siguiendo la técnica descrita por McLean (38) basada en la extracción con acetato de amonio 1N ajustado a pH 4.8, y la posterior determinación colorimétrica de la concentración de aluminio por el método de aluminona propuesto por Chenery (1948-1955) y adaptado por McLean (38). El "aluminio extraíble" determinado con la técnica descrita, comprende el aluminio cambiable, hidróxido de aluminio soluble y probablemente algunos monómeros y polímeros hidroxialumínicos (38).

3.4.2.5 Determinación de Oxidos libres de hierro

Para determinar los óxidos libres de hierro o hierro libre (Fe_2O_3), se usó la técnica descrita por Bornemisza e Igue (7) en base al método de Kilmer (31), principalmente en la fase de extracción, pues la determinación cuantitativa se hizo por medio de un espectrofotómetro de

absorción atómica Beckman DB, en alícuotas de 2 ml del extracto diluído a 100 ml con agua destilada.

El procedimiento seguido para la extracción se modificó al llegar a la etapa de obtención de la alícuota para determinar el contenido de hierro, ya que una vez agitada la suspensión durante 12 horas, se centrifugó, se filtró y se llevó el volúmen del filtrado a 100 ml con agua destilada, y de este extracto se tomó directamente la alícuota para la lectura en el espectrofotómetro sin haber oxidado el Fe (II) a Fe (III), en base a la experiencia de Mosquera (42), quien al comparar las dos modalidades no encontró diferencias significativas.

3.4.2.6 Determinación de Fósforo Disponible

Para la determinación de fósforo disponible se siguió la técnica descrita por Saiz del Río y Bornemisza (49) en base al método de Bray y Kurtz (9). Este método, conocido como Bray 1, determina la fracción de fósforo extraíble de suelos ácidos con soluciones ácidas.

El método usa como solución extractora Fluoruro de amonio 0.03N en medio ácido (HCL 0.025N), que tiene la propiedad de disolver los fosfatos de Fe (II) y de aluminio, y la parte más activa de los fosfatos de calcio por acción del ion F_2^{-2} al formar complejos con estos cationes.

3.4.2.7 Determinación de Materia Orgánica

La materia orgánica se determinó de acuerdo con el método de Walkley-Black descrito por Jackson (32) y Saiz del Río y Bornemisza (49), el cual se basa en la oxidación de la materia orgánica con ácido crómi-

co en presencia de H_2SO_4 como fuente de calor, y la posterior valoración del exceso de ácido crómico con la solución "sal de Mohr". Con este método se logra oxidar el 77% de la materia orgánica, excluyendo casi totalmente el carbono elemental presente (49).

A partir del contenido de materia orgánica determinado, se estimó el porcentaje de carbono orgánico, en base a la hipótesis de que la materia orgánica contiene un 58% de carbono como promedio (49).

|| 3.4.3.8 Determinación de Nitrógeno Total

El nitrógeno total fue determinado de acuerdo con el método de Bremner (10) modificado por Díaz-Romeu.[¶] Este método se basa en el procedimiento analítico de Kjeldahl, en escala semimicro, de conversión del N en $(NH_4)_2SO_4$ por digestión del suelo con H_2SO_4 en presencia de una mezcla catalizadora compuesta de sulfato de potasio, sulfato de cobre y selenio, y en la posterior destilación del amonio, que al ser recibido en ácido bórico al 2%, es determinado por titulación con ácido sulfúrico aproximadamente 0.025N. ||

3.4.3.9 Determinación de Alofana

La presencia de alofana fue determinada cualitativamente de acuerdo con el método de Fieldes y Perrott (23), el cual se basa en la particularidad de la alofana de liberar hidróxilos al ser tratada con FNa 1M. Esta liberación de iones OH^- incrementa el pH a valores comprendidos entre 9,5 y 10,4, dos minutos después de aplicado el tratamiento a suelos con predominancia de alofana en su fracción activa. Este incre

(¶) Comunicación personal del Ing. Roberto Díaz-Romeu, Edafólogo del CEI, IICA, Turrialba, Costa Rica.

mento de pH es fácilmente detectable en papel filtro con fenolftaleína como indicador, al tornarse de color rojo cuando la muestra tratada sobre él contiene como mínimo un 7% de alofana, de color rosado cuando el contenido es entre 5 y 7% y permaneciendo sin cambiar de color cuando es menor de 5%. Sin embargo, como al efectuar la prueba se encontraron distintas intensidades de rojo, el resultado de la prueba se calificó de acuerdo a una escala de 0 a 4, en la cual 0 significa ausencia de color, 1 rosado, 2 rojo pálido, 3 rojo y 4 rojo intenso.

Complementariamente fueron seleccionados los cuatro perfiles, uno por cada país, que se consideraron representativos del andosol típico, y las muestras correspondientes a los horizontes de cada uno de ellos se analizaron para determinar cuantitativamente su contenido de alofana, de acuerdo con el método descrito por Jackson (33).

La alofana soluble se determinó por la diferencia de peso encontrado, entre una muestra tratada con NaOAc normal y H_2O_2 del 35% para eliminar el contenido de bases y materia orgánica, y otra tratada adicionalmente con citrato de sodio, bicarbonato de sodio y ditionito de sodio para eliminar el contenido de alofana soluble y óxidos libres de hierro, a cuyo peso fue adicionado el correspondiente a la relación $Fe_2O_3/0,85$ que representa el contenido de goetita hidratada o limonita.

La alofana no soluble fue determinada encontrando el llamado "valor delta" de la capacidad de intercambio catiónico, el cual no es más que el correspondiente a las cargas negativas netas de la fracción activa dependientes del pH. Esta determinación se llevó a cabo encontrando la diferencia entre la CIC (meq/100 g de suelo) de una muestra, me-

dida a pH 3,5 (tratada con solución "buffer" de acetato).

3.4.3 Análisis Estadístico

Para los efectos del análisis estadístico de la información lograda a través del estudio, se utilizó el equipo de cálculo electrónico de la Universidad de Costa Rica, cuya unidad principal es una computadora IBM 1620-K.

La información de cada suelo fue perforada en tarjetas por horizonte, de manera que cada tarjeta incluyó los datos sobre las características de los sitios de muestreo y las propiedades físicas y químicas de cada horizonte, haciendo un total de 39 variables.

Las tarjetas con los datos fueron ordenadas en 3 grupos, correspondiendo cada uno de ellos a los horizontes A, B y C, y luego procesadas independientemente en el equipo de cómputo, usando lenguaje Fortran 2, para análisis de variancia y de correlación simple.

El proceso analítico permitió cuantificar la variabilidad existente a través de medias aritméticas y de la variancia (s^2) correspondientes a cada propiedad considerada como variable, y a partir de la variancia pudo calcularse la respectiva desviación típica (s).

Finalmente, para conocer el grado de relación entre cada una de las variables, el análisis de correlación permitió evaluar los coeficientes de correlación (r) y de asociación (r^2) de cada uno de los pares de variables que se consideraron de mayor importancia.

4. RESULTADOS Y DISCUSION

Los resultados obtenidos para la caracterización de los suelos que motivan el presente estudio, comprenden información sobre las principales características de los sitios de muestreo y sobre las más importantes propiedades físicas y químicas determinadas en 94 muestras procedentes de 39 perfiles que se localizaron a través de toda el área como se ilustra en la figura 1.

La discusión de estos resultados se hace en general, considerando toda el área como una sola región en vista de que las condiciones climáticas y topográficas imperantes, son muy similares y solamente varían en función de la altitud sobre el nivel del mar, y luego por países con fines puramente comparativos.

4.1 Discusión de resultados en general

Los suelos estudiados, que permitieron identificar 60 horizontes A, 23 horizontes B y 11 horizontes C, procedieron de 39 perfiles distribuidos por país en la forma siguiente:

<u>País</u>	<u>Perfiles</u>	<u>Horizontes A</u>	<u>Horizontes B</u>	<u>Horizontes C</u>
Guatemala	12	23	5	4
El Salvador	11	17	5	5
Nicaragua	5	8	3	2
Costa Rica	11	12	10	0

La desigualdad en el número de horizontes con respecto al número de perfiles se debe a la presencia de subhorizontes y a la falta de uniformidad encontrada en los perfiles muestreados, pues mientras unos

mostraron solamente horizontes A de gran profundidad o fueron perfiles AC, otros mostraron horizontes A y/o B de perfiles enterrados. La presencia de perfiles enterrados se explica por la deposición frecuente de cenizas volcánicas y la de perfiles AC, por el grado de desarrollo débil que los coloca en la categoría de suelos jóvenes.

4.1.1 Características de los sitios de muestreo

Como puede observarse en el cuadro 2, donde se describen los sitios de muestreo, los suelos estudiados procedieron de las zonas ecológicas siguientes:

- a) De bosque montano muy húmedo, 4 suelos (G17, CR11, CR36, y CR37) localizados entre 1600 y 2600 m de altitud, con una temperatura media anual de $14,5^{\circ}\text{C}$, una precipitación media anual de 2750 mm y un período seco de 4 meses;
- b) De bosque montano húmedo, 2 suelos (G18 y G19) localizados a 2800 y 3000 m de altitud, con una temperatura media anual de $9,6^{\circ}\text{C}$, 2100 mm de precipitación media anual y 5 meses de período seco;
- c) De bosque montano bajo muy húmedo, 1 suelo (CR35) localizado a 1900 m, con una temperatura media anual de $16,6^{\circ}\text{C}$, 3000 mm de precipitación media anual y 4 meses de período seco;
- d) De bosque montano bajo húmedo, 2 suelos (G1 y G2) localizados a 1400 m, con una temperatura media anual de 19°C , 2000 mm de precipitación media anual y 5 meses de período seco;
- e) De bosque premontano muy húmedo, 3 suelos (G3, G16 y CR6) lo

calizados entre 1700 y 1800 m, con una temperatura media anual de 16.8°C , 2730 mm de precipitación media anual y 4 meses de período seco;

- f) De bosque premontano húmedo, 12 suelos (ES1, ES2, ES6, ES8, ES5, ES9, ES12, ES13, CR8, CR10, CR30 y CR31), localizados entre 600 y 1300 m, con una temperatura media anual de 21.6°C , una precipitación media anual de 1940 mm y un período seco de 5 meses;
- g) De bosque premontano seco, 2 suelos (G25 y G26), localizados a 1400 y 1500 m, con una temperatura media de 19.2°C , una precipitación media anual de 1100 mm y 6 meses de período seco;
- h) De bosque tropical húmedo, 3 suelos (G8, G9 y G11), localizados entre 300 y 500 metros, con una temperatura media de 24.7°C , 3040 mm de precipitación media anual y un período seco de 4 meses; e
- i) De bosque tropical seco, 10 suelos (ES3, ES11, ES20, N2, N3, N5, N14, N15, CR41, y CR42) localizados entre 60 y 500 m de altitud, con una temperatura media de 25.5°C , una precipitación de 1620 mm y 6 meses de período seco.

La pendiente de los sitios de muestreo varió entre el 2 y el 20%, con un promedio del 8.5% en las regiones correspondientes a bosque montano, del 4.3% en las de bosque premontano y del 2.5% en las de bosque tropical.

En correspondencia con la pendiente y la altitud se observa que

la clasificación de Uso Potencial de la tierra (46), va de IA y IP para uso intensivo con cultivos anuales y perennes en las áreas de menor pendiente y de menor elevación, y de IIA y IIP para uso extensivo con cultivos anuales y perennes en las áreas de pendiente moderada a elevaciones medianas, hasta IIIPi y IIID para uso forestal en las áreas de topografía más accidentada en las regiones de mayor elevación.

Un análisis de correlación entre estas variables que caracterizan las condiciones climáticas, topográficas, ecológicas y de uso potencial de los sitios de muestreo, cuyo resultado se resume en el cuadro 3, revela que se correlacionan significativamente al nivel del 1% probabilidad; sin embargo, el índice de asociación que indicaría el grado de dependencia, sólo es alto (más del 79%) entre las variables Altitud-Temperatura, Altitud-Formación Vegetal, Temperatura-Formación Vegetal y Precipitación-Meses Secos, y medio (46-55%) entre las variables Altitud-Declive, Altitud-Uso Potencial, Temperatura-Declive y Temperatura-Uso Potencial.

La alta correlación encontrada entre la altitud y la temperatura ($r = -0.988$), entre la altitud y la formación vegetal ($r = -0.904$) y entre la temperatura y la formación vegetal ($r = 0.890$), indica que la temperatura decrece al aumentar la altitud con un grado de dependencia del 98% y que la formación vegetal, de acuerdo con el código usado para el cómputo, va de bosque tropical a bosque montano a medida que aumenta la altitud y disminuye la temperatura, con un grado de dependencia del 82 y el 79% respectivamente.

CUADRO No. 3: Matriz de Correlaciones y porcentaje de asociación entre las variables que caracterizan las condiciones climáticas, Topográficas y de uso potencial de los sitios de muestreo.

	<u>Altitud</u>	<u>Temp.</u>	<u>Precip.</u>	<u>Meses Sec.</u>	<u>Declive</u>	<u>Form. Veg.</u>	<u>Uso Potenc.</u>
Altitud	1.000	-0.988 ^{***}	0.387 ^{***}	-0.542 ^{***}	0.678 ^{***}	-0.904 ^{***}	0.744 ^{***}
	100%	98%	15%	29%	46%	82%	55%
Temperat.		1.000	-0.364 ^{***}	0.511 ^{***}	-0.693 ^{***}	0.890 ^{***}	-0.726 ^{***}
		100%	13%	26%	48%	79%	53%
Precipit.			1.000	-0.892 ^{***}	0.480 ^{***}	-0.367 ^{***}	0.543 ^{***}
			100%	80%	23%	13%	29%
Meses Sec.				1.000	-0.565 ^{***}	0.527 ^{***}	-0.587 = R
				100%	32%	28%	34%
Declive					1.000	-0.569 ^{***}	0.571 ^{***}
					100%	32%	33%
Form. Veg.						1.000	-0.583 ^{***}
						100%	34%
Uso Potenc.							1.000
							100%

*** Significativo al 1% de Probabilidad

n = 94

La correlación entre la altitud y el declive ($r = 0.678$), entre la temperatura y el declive ($r = -0.693$) y entre la formación vegetal y el declive ($r = -0.569$) sugiere, con índices de asociación moderados (46, 48, 32%), que la topografía se hace más escarpada a medida que se va de bosque tropical a bosque montano, lo cual coincide con el aumento de la altitud y la disminución de la temperatura.

La correlación entre la altitud y la precipitación ($r = 0.387$), aunque altamente significativa, muestra un índice de asociación muy bajo (15%), explicable por la presencia de sitios con alta precipitación tanto a altitudes bajas como a gran elevación.

Por otro lado se encontró también que, tanto la formación vegetal como la clasificación de uso potencial, correlacionaron significativamente, aunque con índices de asociación bajos, con algunas propiedades del suelo especialmente en los horizontes A y B (cuadro 4).

Estas correlaciones señalan en general, que a medida que se va de bosque montano donde la clase de uso potencial es principalmente III (uso forestal), hacia bosque tropical donde las clases de uso potencial predominantes son I y II (uso intensivo y extensivo respectivamente), tienden a aumentar el pH, el porcentaje de saturación de bases y los contenidos de bases cambiables, y a disminuir la CIC total y los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total y Al extraíble.

Estas tendencias se explican por la asociación existente entre la formación vegetal y los factores climáticos precipitación y temperatura discutidos anteriormente (cuadro 3), pues al disminuir la precipitación en la zona de bosque tropical donde la temperatura es ma -

CUADRO No. 4: Correlaciones entre la formación vegetal y la Clasificación de Uso Potencial y alguna propiedad del suelo en los horizontes A, B y C.

Propiedad	<u>FORMACION VEGETAL</u>						<u>USO POTENCIAL</u>					
	Horiz. A		Horiz. B		Horiz C		Horiz. A		Horiz B		Horiz. C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²	r	r ²	r	r ²	r	r ²
M. Parental	.191	-	-.055	-	-.178	-	-.228	-	.037	-	.248	-
G. Desarr.	-.053	-	.188	-	-.096	-	-.074	-	-.160	-	.042	-
% de arena	.240	-	.068	-	.200	-	-.010	-	.055	-	.491	-
% Limo+arc.	-.240	-	-.068	***	-.200	-	.010	***	-.055	-	-.491	-
pH (H ₂ O)	.546 ^{***}	0.30	.618 ^{***}	0.38	.331	-	-.503 ^{***}	0.25	-.314 ^{**}	-	-.002	-
M. Orgánica	-.321 ^{**}	0.10	-.431	-	-.089	-	.489 ^{***}	0.24	.475 ^{**}	0.23	-.131	-
N Total	-.239 ^{**}	0.06	-.353	-	.320	-	.456	0.21	.401	-	-.262	-
Rel. C/N	-.176	-	.437	-	.259	-	-.014	-	.438	-	.273	-
Fe ₂ O ₃	-.131	-	-.153	-	-.031	-	-.037	-	-.228	-	.303	-
P Dispon.	.103 ^{***}	-	.230	-	.255	-	-.295 ^{***}	-	-.392	-	-.239	-
Al Extr.	-.456	0.21	-.523 ^{***}	0.27	.278	-	.564	0.32	.491 ^{**}	0.24	.311	-
CIC total	-.253 ^{**}	0.06	-.165	-	-.146	-	.337 ^{***}	0.11	.149	-	.023	-
Ca. Camb.	.319 ^{**}	0.10	.569 ^{***}	0.32	.447	-	-.326	0.10	-.367	-	-.190	-
Mg Camb.	.398 ^{***}	0.16	.396	-	-.170	-	-.394 ^{***}	0.16	-.278	-	-.144	-
K camb.	.202	-	-.165	-	-.086	-	-.296 ^{**}	0.09	.326	-	-.398	-
Sat.Bases	.530 ^{***}	0.28	.573 ^{***}	0.32	.317	-	-.571 ^{***}	0.33	-.431 ^{***}	0.19	-.420	-

** Significativo al 5% de Probabilidad

*** Significativo al 1% de Probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

yor, se hace menos intensa la lixiviación, menos exuberante la vegetación y se intensifican los procesos de meteorización. Bajo estas condiciones, tienden a aumentar, la concentración de bases cambiables y el porcentaje de saturación de bases, incrementándose el pH hasta niveles donde la actividad del Al es limitada. también tiende a ser menor la cantidad de residuos vegetales y más rápida su descomposición, lo cual repercute en los bajos contenidos de materia orgánica, que a su vez bajan la CIC total y el contenido de nitrógeno total.

La falta de significación estadística en los valores de "r" correspondientes a las correlaciones con las demás propiedades, sugiere que son independientes.

El grado de dependencia entre las variables, altitud, temperatura, formación vegetal y declive, entre la altitud y la precipitación pluvial y entre la formación vegetal-uso potencial y las propiedades del suelo, sugiere la posibilidad de agrupar los suelos estudiados de acuerdo con el tipo de formación vegetal.

Se infiere entonces, que los suelos derivados de cenizas volcánicas en Centroamérica podrían ser estudiados, en relación a la zona ecológica en que se localicen, en suelos volcánicos de bosque montano, suelos volcánicos de bosque montano bajo, suelos volcánicos de bosque premontano y suelos volcánicos de bosque tropical.

En coincidencia con la descripción de perfiles de las series a las cuales pertenecen los suelos estudiados (17, 18, 47, 59), se encontró que el material parental correspondió a ceniza volcánica blanca de tipo pumiceo en 22 perfiles (G1, G2, G8, G11, G16, G17, G18, G19, ES1,

ES2, ES5, ES6, ES8, ES9, ES11, ES12, ES13, ES20, N2, N15, CR41, y CR42), a ceniza volcánica gris en 11 perfiles (N3, N5, CR6, CR8, CR10, CR11, CR30, CR31, CR35, CR36 y CR37), a escoria máfica de color negro en 4 perfiles (G3, G25, G26 y N14), a lahar pedregoso de color negro en un perfil (G9) y a aluvión piroclástico de color negro en un perfil (ES3).

De acuerdo con el material efusivo de los principales volcanes de Centroamérica identificado por Wevl (66) y descrito en el cuadro 1, podría inferirse que la naturaleza mineralógica de las cenizas blancas es andesítica, la del material piroclástico de color negro, basáltica y la de las cenizas grises, andesito-basáltica. Sin embargo, para una mejor identificación habrán de realizarse estudios petrográficos y mineralógicos directos, lo cual estuvo fuera del alcance de la presente investigación.

4.1.2 Principales propiedades de los suelos estudiados

En los cuadros 20, 23, 26, 29 se presentan los resultados sobre las propiedades físicas correspondientes a los suelos de Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica respectivamente, los cuales incluyen determinaciones de profundidad, color en seco y en húmedo, distribución granulométrica y textura de cada horizonte. Como información complementaria se incluye además la suma del contenido porcentual de limo y arcilla por considerar que se trata de un complejo más representativo de la fracción activa de estos suelos, en vista de la defectuosa dispersión de las arcillas lograda por medio del método tradicional en el análisis mecánico.

Siguiendo el mismo orden por país, en los cuadros 21, 24, 27 y 15 se presentan los resultados correspondientes a los mismos horizontes, sobre las propiedades químicas pH (H_2O), pH ($CaCl_2$) y contenido de materia orgánica, nitrógeno total, óxidos libres de hierro, fósforo disponible, aluminio "extraíble" y alofana, y sobre la relación C/N.

Los resultados obtenidos sobre otras propiedades químicas relacionadas con el complejo de adsorción se presentan con igual ordenamiento por país, en los cuadros 22, 25, 28, y 31. Estas propiedades se refieren a la capacidad de intercambio catiónico total y de la fracción mineral, al contenido de calcio, magnesio y potasio cambiables, la saturación de bases y la relación entre las bases divalentes y entre éstas y la monovalente. La CIC de la fracción mineral fue estimada por diferencia, al asumir que la materia orgánica tiene en promedio una CIC de 2 meq/gramo (39).

El cuadro 5 resume dichas propiedades e ilustra la variabilidad observada a través de valores representativos de las medias aritméticas y sus respectivas desviaciones típicas.

4.1.2.1 Propiedades Físicas

4.1.2.1.1 Profundidad de los Horizontes

En los 39 perfiles estudiados se encontraron 17 del tipo A(B)C, 3 del tipo ABC, 3 del tipo AC, y 16 del tipo de perfil enterrado, dando lugar a identificar 60 horizontes A, 23 horizontes B y 11 horizontes C.

De los 60 horizontes A identificados, 39 horizontes fueron A_1 con un espesor que varía de 15 a 100 cm, 7 fueron horizontes A_3 , con un es

Cuadro 5. Medias y desviaciones típicas de las principales propiedades del suelo en los horizontes A, B y C.

Propiedad	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	\bar{X}	s	\bar{X}	s	\bar{X}	s
Profundidad Horizonte (cm)	54	-	40	-	-	-
Color en seco	10 YR 4/2,5	-	10 YR 5/4	-	10 YR 6/2	-
Color en húmedo	10 YR 2,5/2	-	10 YR 3,5/4	-	10 YR 6/2	-
Arena (%)	41,55	± 21,33	41,63	± 19,77	55,45	± 22,21
Limo (%)	41,56	± 17,37	36,87	± 11,49	38,49	± 21,21
Arcilla (%)	16,89	± 14,07	21,50	± 19,74	6,05	± 5,43
Limo + Arcilla (%)	58,45	± 21,33	58,37	± 19,77	44,55	± 22,21
pH (H ₂ O)	6,3	-	6,3	-	6,8	-
pH (CaCl ₂ 0,01 M)	5,5	-	5,5	-	5,9	-
Materia Orgánica (%)	9,28	± 7,04	3,14	± 2,66	0,28	± 0,27
Nitrógeno Total (%)	0,40	± 0,32	0,13	± 0,10	0,01	± 0,00
Relación C/N	13,78	± 3,22	16,39	± 8,57	7,09	± 6,76
Fe ₂ O ₃ (%)	2,04	± 1,08	2,70	± 1,54	0,42	± 0,14
P disponible (ppm)	5,90	± 9,24	1,20	± 1,55	3,76	± 6,30
Al Extraíble (meq. %)	4,46	± 5,84	3,63	± 4,07	1,19	± 2,20
CIC Total (Meq. %)	33,76	± 19,38	32,58	± 13,80	9,33	± 3,33
CIC fr. min. (meq. %)	15,84	± 12,97	26,30	± 12,65	8,80	± 2,85
Ca cambiabile (meq. %)	9,65	± 6,39	7,41	± 6,48	4,33	± 2,12
Mg cambiabile (meq. %)	2,02	± 1,68	2,28	± 2,46	1,11	± 0,33
K cambiabile (meq. %)	1,61	± 1,24	1,72	± 1,00	1,21	± 0,69
Sat. de Bases (%)	45,47	± 43,20	40,91	± 25,47	72,18	± 18,40
Relación Ca/Mg	5,01	± 2,45	3,50	± 1,89	4,03	± 1,77
Relación Ca/K	9,28	± 9,11	6,38	± 6,94	4,32	± 2,08
Relación Mg/K	1,79	± 1,57	1,91	± 2,40	1,50	± 1,46
Relación Ca + Mg/K	11,05	± 10,49	8,30	± 9,20	5,80	± 3,29

pesor que varía de 30 a 60 cm, 11 fueron horizontes IIA, con espesor de 30 a 100 cm, y 3 fueron horizontes IIA₃ con un espesor no determinado. En general el espesor del horizonte A fue alrededor de 54 cm (15-200 cm), lo cual sugiere que se trata de suelos profundos, aunque con una gran variabilidad debido al distinto grado de desarrollo del perfil.

En los 23 horizontes B se encontraron 15 horizontes B de perfil normales ABC y 8 horizontes IIB de perfiles enterrados, con espesores que variaron de 20 a 60 cm y de 40 a 100 cm respectivamente.

En los 11 horizontes C se identificaron 7 horizontes C₁, 2 horizontes C₂ y 2 horizontes IIC, localizados desde 15 hasta 300 cm de profundidad.

La variabilidad encontrada en el tipo y espesor de los horizontes, hace evidente la influencia de las deposiciones de ceniza volcánica, no sólo periódicas sino recientes, reflejada en la presencia de perfiles AC representativos de suelos jóvenes, de perfiles enterrados y de horizontes A de escaso espesor.

Para conocer el efecto de la profundidad del perfil sobre algunas propiedades del suelo, se llevó a cabo un análisis de correlación entre estas variables, asignando a los horizontes A, B y C valores de 1, 2 y 3 respectivamente como índices de la profundidad.

Los resultados que se presentan en el cuadro 6, revelan que la mayor profundidad, tienden a aumentar el "value" en seco y el "value" y la "chroma" en húmedo, el pH determinado en H₂O y en CaCl₂ 0.01M y el porcentaje de saturación de bases, y a disminuir la CIC total, las

Cuadro 6. Correlaciones entre la profundidad del perfil y algunas propiedades del suelo.

Propiedad	r	r ²
Matiz en seco	-0,012	--
Valor en seco	0,735**	0,54
Croma en seco	0,073	--
Matiz en Húmedo	0,056	--
Valor en Húmedo	0,722**	0,52
Croma en Húmedo	0,518**	0,27
Porcentaje de arena	0,168	--
Porcentaje de limo	-0,100	--
Porcentaje de arcilla	-0,125	--
Porcentaje de limo + arcilla	-0,168	--
pH (H ₂ O)	0,267**	0,07
pH (Ca Cl ₂)	0,215*	0,05
Materia orgánica	-0,512**	0,26
Nitrógeno total	-0,495**	0,25
Relación C/N	-0,207*	0,04
Fe ₂ O ₃	-0,225*	0,05
Fósforo disponible	-0,178	--
Aluminio extraíble	-0,190	--
Alofana	-0,090	--
CIC Total	-0,346**	0,12
Calcio cambiabile	-0,286**	0,08
Magnesio cambiabile	-0,102	--
Potasio cambiabile	-0,072	--
% saturación de Bases	0,243*	0,06
Relación Ca/Mg	-0,235*	0,06
Relación Ca/K	-0,220*	0,05
Relación Mg/K	-0,028	--
Relación Ca + Mg/K	-0,191	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad n=94.

relaciones C/N, Ca/Mg, y Ca/K y los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total, FE_2O_3 y Ca cambiable. También revelan que la tendencia mostrada por el matiz y la cromía del color determinado en seco y el matiz en húmedo, la textura, las relaciones Mg/K y Ca + Mg/K y los contenidos de P disponible, Al extraíble y de Mg y K cambiables, no fue estadísticamente significativa.

Como los índices de asociación correspondientes reflejan un grado pobre de dependencia entre estas variables, se infiere que solamente debe ser considerada la tendencia general cuando más adelante sean discutidas cada una de estas propiedades.

4.1.2.1.2 Color

En el horizonte A el color en seco varió de pardo oscuro a pardo grisáceo con una matiz o "hue" 10YR en el 75%, 7,5YR en el 10% y 2.5Y en el 15% de los horizontes considerados, y con un "value" y una "chroma" que varía de 3 a 5 y de 1 a 4 respectivamente. El color determinado en húmedo fue más oscuro que el determinado en seco, variando de negro hasta pardo rojizo oscuro con un "hue" 10YR en el 55%, 7,5YR en el 25%, 2.5YR en el 2%, 2.5Y en el 3% y 5Y en el 10% de los horizontes considerados, y con un "value" y una "chroma" que varió de 2 a 3 y de 0 a 4 respectivamente.

El horizonte B mostró en general un color en seco entre pardo y pardo amarillento, pero se encontraron en algunos casos colores pardo rojizo y gris parduzco claro. En el 76% de las muestras el matiz fue 10YR. El "value" varió entre 4 y 6 y la "chroma" entre 3 y 6. En húmedo el color se hizo más oscuro variando de pardo rojizo os

curo a pardo amarillento oscuro con un "hue" 10YR, 7.5YR, 5YR y 2.5YR en el 52, 22, 22 y 4% de las muestras respectivamente. El valor varió de 2 a 5 y la croma de 2 a 6.

En casi la totalidad de los horizontes C el color se hizo más claro aún, variando de pardo muy pálido a gris y blanco. En el 82% de las muestras el "hue" fue 10YR con un "value" entre 4 y 8 y una "chroma" entre 1 y 3. En las muestras restantes el color fue 7.5YR 5/0 y 5Y 8/1. En húmedo se mantuvieron constantes del "hue" y la "chroma" bajando el "value".

En general el color de los horizontes cuyo "hue" fue principalmente 10YR, se hizo ostensiblemente más claro a medida que se profundizó en el perfil excepto en los perfiles cuyo material parental era escoria máfica de color gris casi negro, donde la tendencia de color más claro llegaba solamente al horizonte B, para luego oscurecerse abruptamente al llegar al horizonte C, como puede observarse en la figura 2.

Al correlacionar los componentes del color (matiz, valor y croma) con el contenido de materia orgánica y óxidos libres de hierro como factores de los cuales se cree depende la coloración del suelo (cuadro 7), se encontró que la materia orgánica correlacionó, negativamente, con el valor en seco ($r = -0.343$) y con la croma en húmedo ($r = -0.341$). Esta correlación significativa al nivel del 1% de probabilidad, fue sin embargo, de bajo índice de asociación, lo cual sugiere que el valor y la croma disminuyen al aumentar el contenido de materia orgánica en el horizonte A, pero con un grado pobre de dependencia.

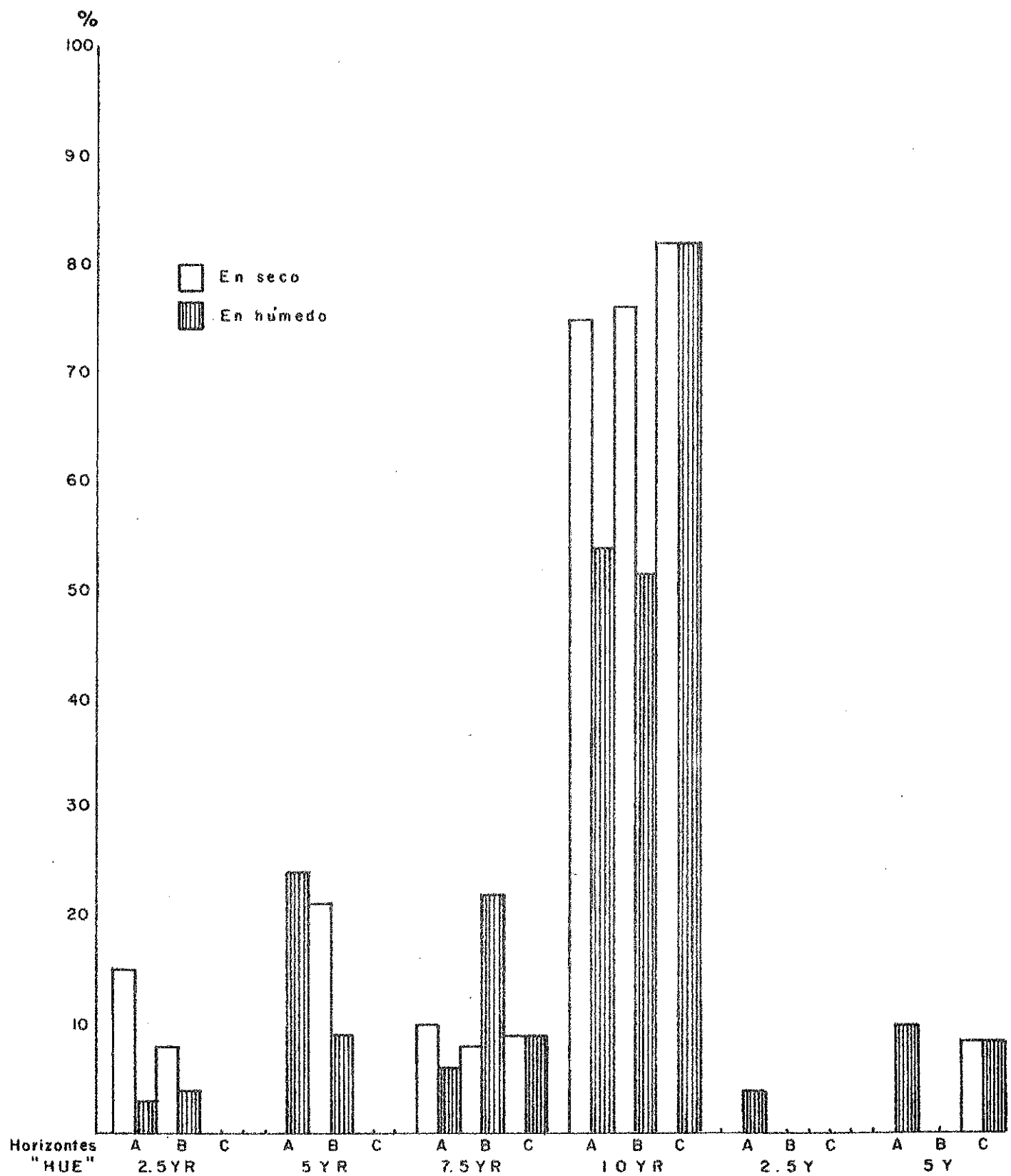


FIGURA 2.- DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS DEL "HUE" EN LOS HORIZONTES A, B Y C.-

Por otro lado, no obstante, se encontró una correlación altamente significativa y positiva entre el valor y la profundidad del perfil, tanto en seco ($r = 0.735$) como en húmedo ($r = 0.722$), y entre la croma en húmedo y la profundidad del perfil ($r = 0.518$), lo cual indica que el valor y la croma aumentan con la profundidad. Esto último no solamente confirma que el color se hace más claro en los horizontes inferiores, donde el contenido de materia orgánica es menor, sino explica la influencia de la materia orgánica sobre la tonalidad del color, pobremente inferida al considerar aisladamente el análisis de correlación entre el valor y el contenido de materia orgánica.

También se encontró que el matiz, el valor y la croma correlacionaron significativamente ($P = 1\%$) con el contenido de óxidos libres de hierro. La correlación entre el matiz y el contenido de Fe_2O_3 , fue significativa en seco para los horizontes A ($r = -0.258$) y B ($r = -0.522$), y altamente significativa en húmedo para el horizonte A ($r = -0.390$), pero de nuevo con bajo coeficiente de asociación. Esto sugiere que, aunque pobre, existe dependencia entre el matiz y el contenido de Fe_2O_3 , tornándose más rojizo aquel a medida que aumenta el contenido de éste.

El contenido de Fe_2O_3 correlacionó, negativamente, con el valor en el horizonte C tanto en suelo ($r = -0.915$) como en húmedo ($r = -0.763$), y positivamente con la croma en el horizonte A en seco ($r = 0.525$) y en húmedo ($r = 0.438$). Esto indica que en el horizonte C es más evidente la influencia del contenido de Fe_2O_3 sobre la expresión del color, pues este se hace más claro (aumenta el valor) a

CUADRO No. 7: Correlaciones entre los componentes del color y el contenido de M.O. y Fe₂O₃ en los horizontes A, B y C.

	<u>MATERIA ORGANICA</u>			<u>Fe₂O₃</u>		
	A	B	C	A	B	C
En Seco:						
Hue	0.187	-0.201	0.560	-0.258 [*]	-0.522 [*]	-0.538
Value	-0.343 ^{**}	-0.158	0.141	-0.136	-0.293	-0.915 ^{**}
Chroma	-0.110	0.073	0.665 [*]	0.525 [*]	0.386	-0.444
En Húmedo:						
Hue	0.125	0.166	-0.084	-0.390 [*]	0.398	-0.137
Value	-0.110	-0.196	0.236	0.121	0.144	-0.763 ^{**}
Chroma	-0.341	-0.234	0.546	0.438 ^{**}	0.207	-0.509

^{*} Significativo al 5% de Probabilidad

^{**} Significativo al 1% de Probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

medida que disminuye el contenido de Fe_2O_3 , y que la croma en el horizonte a tiende a aumentar (expresando más el tono rojizo) a medida que aumenta el contenido de Fe_2O_3 .

Puede concluirse entonces, que tanto la materia orgánica como el Fe_2O_3 tendieron a afectar la expresión del color haciéndolo más oscuro y/o más rojizo a medida que aumenta su contenido respectivamente.

4.1.2.1.3 Textura

De acuerdo con la distribución granulométrica se encontró que las medias de la fracción arena fueron 41.6, 41.6, y 55.5% con desviaciones típicas de ± 21.3 , ± 19.8 y ± 22.5 para los horizontes A, B y C, respectivamente. Para la fracción limo las medias fueron 41.6, 36.9 y 38.5% con desviaciones típicas de ± 17.4 , ± 11.5 y ± 21.2 ; y para la fracción arcilla 16.9, 21.5 y 6.1% con desviaciones de ± 21.3 , ± 19.8 y ± 22.5 en los mismos horizontes.

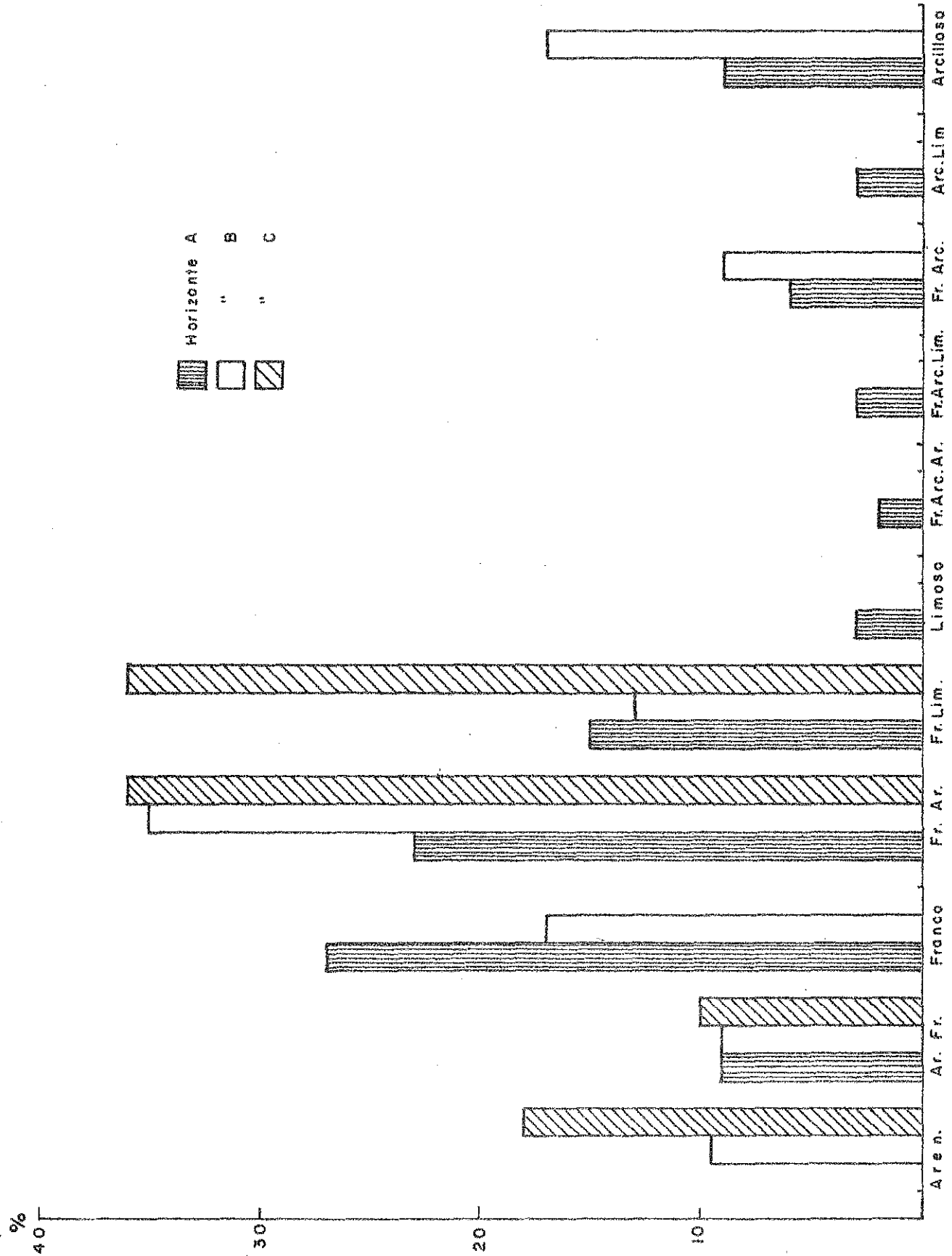
Según estas medias, presentadas en el cuadro 7, la tendencia general muestra que la fracción arena se mantiene uniforme en los horizontes A y B para luego subir en el horizonte C, que la fracción limo se mantiene casi uniforme en los tres horizontes y que la fracción arcilla conserva similitud en los horizontes A y B bajando su nivel en el horizonte C. Esta tendencia puede explicarse en términos de la intensidad en que los procesos de meteorización han actuado a través del perfil, pues estos son menos intensos a mayor profundidad. El incremento pequeño que se opera en el nivel de la fracción arcilla del horizonte B, sugiere cierto grado de iluviación de arcillas, principalmente cristalinas, pues no podría esperarse que fueran del tipo amorfo de

bido a su baja dispersibilidad en agua; también sugiere la formación de pseudolimos en el horizonte A, ya que al sumar los contenidos porcentuales de limo y arcilla se observa que sus medias son iguales en el horizonte A (58.5%) y en el B (58.4%).

Los elevados niveles encontrados en las fracciones arena y limo en comparación con los de la fracción arcilla, podrían ser debidos a la deficiente dispersión lograda en el proceso de análisis mecánico de estos suelos, los cuales muestran una marcada tendencia a la formación de pseudolimos y pseudoarenas como consecuencia de la naturaleza amorfa de su fracción coloidal; o bien, a deposiciones relativamente recientes de arenas y cenizas volcánicas, o al efecto de ambas causas.

La distribución granulométrica descrita, afectada por disviaciones típicas que revelan una gran variabilidad, dio lugar a clases texturales igualmente variables, aunque concentradas alrededor de una textura media, como puede observarse en la figura 3.

En el horizonte A se encontró que la textura fue franca en el 27% de los casos, franco arenosa en el 23%, franco limosa en el 15%, arena franca en el 9%, arcillosa en el 9%, franco arcillosa en el 6%, franco arcillo-limosa en el 3%, arcillo-limosa en el 3%, limosa en el 3% y franco arcillo-arenosa en el 2%. En el horizonte B se encontró que la textura fue franco arenosa en el 35% de los suelos, franca en el 17%, arcillosa en el 17%, franco limosa en el 13%, franco arcillosa en el 9% y arena franca en el 9%. En el horizonte C la textura fue franco arenosa en el 36%, franco limosa en el 36%, arenosa en el 18% y arena franca en el 10%.



CLASES TEXTURALES

FIGURA 3.- DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS DE LAS CLASES TEXTURALES EN LOS HORIZONTES A, B Y C. -

Es evidente pues, que la textura media fue predominante tanto a través de todo el perfil como en la totalidad de los suelos estudiados.

Al correlacionar la fracción limo + arcilla con algunas características de los sitios de muestreo y otras propiedades del suelo (cuadro 8), se encontraron valores de "r" estadísticamente significativos únicamente para las correlaciones con las variables material parental, grado de desarrollo y valor y matiz del color determinado en seco y en húmedo respectivamente.

Con respecto al material parental, identificado como ceniza volcánica blanca, gris y negra y codificada para los efectos del análisis estadístico con los números 1, 2 y 3 en ese orden, el valor de $r = -0,338$ indica, aunque con bajo grado de asociación, que el porcentaje de limo + arcilla tiende a ser mayor cuando la ceniza volcánica tiende a ser más clara y posiblemente de naturaleza andesítica de acuerdo con el estudio de Weyl (66).

En relación con el grado de desarrollo, el valor y el matiz, los valores de "r" indican que el porcentaje de limo + arcilla tiende a ser mayor a medida que avanza el grado de desarrollo y disminuyen el valor y el matiz para tornar el color más oscuro y más rojizo.

Todas estas tendencias parecen estar asociadas con el proceso de meteorización pero independientemente de los factores climáticos con cuyas variables los valores de "r" no alcanzaron niveles de significación estadística, pues un mayor grado de desarrollo supone una meteorización más avanzada donde los "value" y "hue" son más bajos

Cuadro 8. Correlaciones entre la fracción limo + arcilla y otras características.

	r	r ²
Altitud	0,075	--
Temperatura	-0,063	--
Precipitación	-0,009	--
Meses secos	0,034	--
Declive	0,027	--
Material parental	-0,338**	0,11
Grado de desarrollo	0,230*	0,05
Profundidad	-0,168	--
Matiz en seco	-0,086	--
Valor en seco	-0,225*	0,05
Croma en seco	0,144	--
Matiz en húmedo	-0,287**	0,08
Valor en húmedo	-0,090	--
Croma en húmedo	0,115	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad

n = 94

como consecuencia de un mayor contenido de materia orgánica y de Fe_2O_3 . En cuanto al material parental, la explicación también sería válida si se acepta que es de naturaleza andesítica con altos niveles de ortosilicatos y vidrio básico que son los minerales de más fácil meteorización de acuerdo con la secuencia propuesta por Fieldes y Swindale, según Birrell (5).

4.1.2.2 Propiedades Químicas

4.1.2.2.1 Reacción del Suelo

El pH determinado en H_2O varió de 4.6 a 7.3 en el horizonte A, de 5.2 a 7.2 en el horizonte B y de 6.2 a 7.8 en el horizonte C; y el determinado en CaCl_2 0.01M varió entre 4.2 y 6.8, 4.2 y 6.1 y entre 5.5 y 7.1 en los horizontes A, B y C respectivamente.

En la figura 4, donde se presenta en porcentajes la distribución de frecuencias de estos pHs arreglados en clases de hasta media unidad de pH de diferencia, puede observarse que aún cuando la variación es amplia entre los mínimos y los máximos, el mayor porcentaje de los pHs determinados en CaCl_2 0.01M corresponde a las clases entre 5.1 y 6.0 (79%), y los pHs determinados en H_2O , a las clases entre 5.6 y 7.0 (83%), excepto en el horizonte C que correspondió a las clases de pHs entre 6.1 y 7.8 (27%). Se trata pues, de suelos que varían principalmente de neutros a ácidos, cuyos pHs medidos en CaCl_2 0,01M son similares a los encontrados en andosoles por varios investigadores (1, 6, 55), y los determinados en H_2O , similares a los encontrados en suelos volcánicos de América Central (39, 43).

Al comparar las dos modalidades usadas en la determinación del

70

60

50

40

30

20

10

□ pH (H₂O)
▨ pH (CaCl₂)

Horiz.
pH

A B C

4.2 - 4.5

A B C

4.6 - 5.0

A B C

5.1 - 5.5

A B C

5.6 - 6.0

A B C

6.1 - 6.5

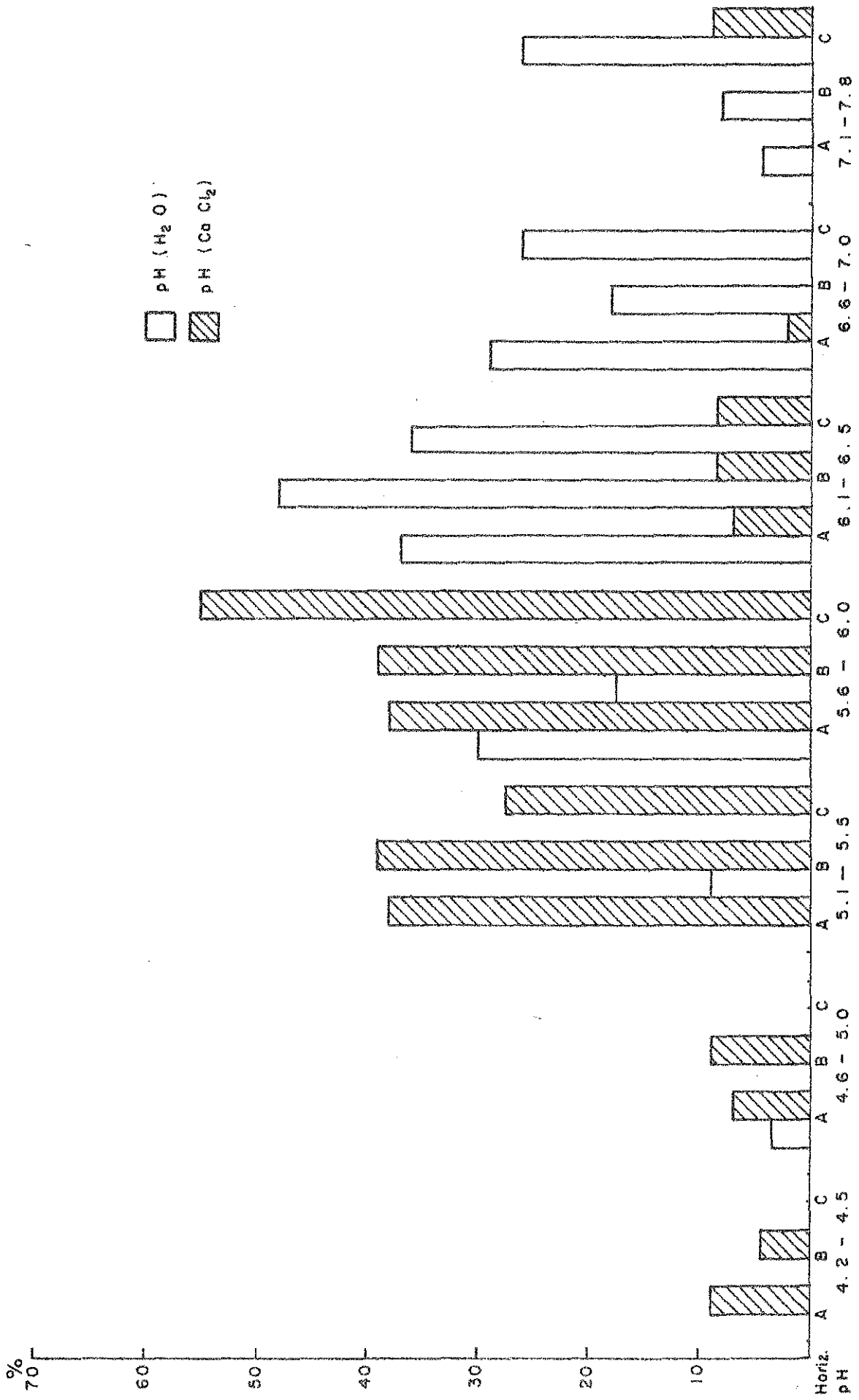
A B C

6.6 - 7.0

A B C

7.1 - 7.8

FIGURA 4.- DISTRIBUCION DE FRECUENCIAS DE LOS RANGOS DE PH EN LOS HORIZONTE A, B Y C.-



pH, se encontró que el determinado en CaCl_2 0,01M fue siempre menor que el determinado en H_2O desde 0,5 hasta una unidad de pH, pero con una dispersión estrecha alrededor de la desviación media, ya que su correlación fue altamente significativa con índices de asociación elevados en los tres horizontes (cuadro 9). El hecho de haber encontrado más bajos los pHs determinados en CaCl_2 0,01M, sugiere que ninguno de los suelos estudiados es eléctricamente neutro o cargado positivamente, y el de haber encontrado una correlación elevada entre ambas modalidades, indica que pueden ser usadas indistintamente, pero teniendo presente que el pH en H_2O es más alto.

Para analizar la tendencia de la variación del pH con respecto a ciertas características de los sitios de muestreo y a otras propiedades del suelo, en el cuadro 9 se presentan los coeficientes de correlación encontrados y sus respectivos índices de asociación.

El efecto de la altitud y el declive sobre el pH, se observó principalmente en el horizonte A donde los coeficientes de correlación estadísticamente significativos al nivel del 1% de probabilidad, sugieren la tendencia del pH de bajar a medida que aumenta la altitud y la pendiente. Con respecto a la temperatura, la precipitación y los meses secos, la tendencia de la variación del pH fue detectada únicamente en el horizonte A, donde los valores de "r" indican con significación estadística que el pH tiende a subir al elevarse la temperatura, disminuir la precipitación y aumentar los meses secos.

En relación con las otras propiedades del suelo, los coeficientes de correlación presentados en el cuadro 9, señalan que en los horizontes A y B el pH tiende a subir a medida que baja el contenido

Cuadro 9. Correlaciones entre el pH determinado en H₂O y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	-0,498**	0,25	-0,450*	0,20	-0,041	--
Temperatura	0,448**	0,20	0,380	--	-0,210	--
Precipitación	-0,569**	0,32	-0,352	--	-0,417	--
Meses secos	0,646**	0,42	0,401	--	0,327	--
Declive	-0,410**	0,17	-0,323	--	0,382	--
Material Parental	0,209	--	0,162	--	0,557	--
Grado de Des.	-0,020	--	-0,184	--	0,705*	0,50
% de arena	0,285*	0,08	0,399	--	0,839**	0,70
% de limo + arcilla	-0,285*	0,08	-0,399	--	-0,839**	0,70
pH (Ca Cl ₂)	0,882**	0,78	0,878**	0,77	0,902**	0,81
Cont. de M.O.	-0,517	0,27	-0,511*	0,26	-0,589	--
Cont. de P disp.	0,088	--	0,133	--	0,649*	0,42
Cont. de Al Ext.	-0,517**	0,27	-0,458*	0,21	0,022	--
Cont. de A lofana	0,051	--	-0,029	--	0,208	--
Cont. de Ca camb.	0,568**	0,32	0,646**	0,42	-0,571	--
Cont. de Mg. camb.	0,436**	0,19	0,474*	0,22	0,200	--
Cont. de K camb.	0,228	--	0,146	--	-0,579	--
% Sat. de Bases	0,691**	0,48	0,634**	0,40	0,291	--
Cont. de Fe ₂ O ₃	0,097	--	-0,095	--	0,391	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad

Horizonte A n = 60

Horizonte B n = 23

Horizonte C n = 11

de materia orgánica y de Al extraíble y aumenta el contenido de Ca y Mg cambiables y el porcentaje de saturación de bases. Esto explica la tendencia del pH en relación con los factores climáticos antes considerados, ya que el contenido de materia orgánica y de Al extraíble aumenta y el contenido de bases cambiables y la saturación de bases disminuyen, al subir la altitud y la precipitación y bajar la temperatura, tal como lo indican los coeficientes de correlación correspondientes presentados en los cuadros 10, 15, 17 y 18.

En general se observaron pHs más altos a mayor profundidad en el perfil pero con una tendencia no bien definida, pues al correlacionar ambas variables (cuadro 6), se encontró un coeficiente de correlación bajo ($r = 0.267$) que aunque significativo estadísticamente da un índice de asociación muy bajo (0.07). Esta tendencia pobremente definida es explicable, pues como puede verse en el mismo cuadro 6, el contenido de calcio cambiable no tiende a aumentar con la profundidad y el contenido de Mg y K cambiables y de Al extraíble no muestra tendencia alguna, aún cuando la saturación de bases tiende a subir al aumentar la profundidad; y por otra parte, la tendencia del pH mostrada en relación con la saturación de bases y los contenidos de Ca y Mg cambiables, materia orgánica y Al extraíble sólo fue evidente en los horizontes A y B, pues en el horizonte C los coeficientes de correlación no alcanzaron significación estadística.

De aquí que, al considerar que el pH depende de la concentración de bases y de aluminio activo, pueda inferirse que la lixiviación de los cationes básicos no es excesiva, o si lo fuera, es enmascarada por

la deposición reciente de cenizas volcánicas que al meteorizarse tienden a compensar las pérdidas por lixiviación.

La tendencia del pH de subir al aumentar el porcentaje de arena y disminuir el de limo + arcilla, parece estar asociado con la deposición reciente de cenizas volcánicas donde la meteorización es incipiente.

Con respecto a las otras características consideradas en este análisis de correlación, no se detectaron tendencias estadísticamente significativas.

4.1.2.2.2 Materia Orgánica

La variación del contenido de materia orgánica en los horizontes A, B y C fue alrededor de las medias 9.28%, 3.14% y 0.28% con desviaciones típicas de ± 7.04 , ± 2.66 y ± 0.27 respectivamente.

Estas medias y sus respectivas desviaciones presentadas en el cuadro 5, evidencian, por un lado, contenidos de materia orgánica en el horizonte A semejantes a los encontrados en andosoles de Sudamérica (67), Japón (34) y México (1), y por otro, que el nivel de materia orgánica es alto en los horizontes A y B, con marcada tendencia a bajar con la profundidad del perfil, tal como lo indica también el valor de "r" altamente significativo encontrado al correlacionar las variables M.O y profundidad (cuadro 6).

Investigadores japoneses (34) atribuyen el alto contenido de M.O de los andosoles, entre otras causas posibles, a la riqueza de aluminio activo que al reaccionar con el humus lo estabiliza inhibiendo su descomposición. Los altos contenidos de materia orgánica

encontrados en los suelos objeto del presente estudio parecen tener la misma explicación, ya que la correlación altamente significativa encontrada entre los contenidos de M.O y Al extraíble (cuadro 10), sugiere que la materia orgánica aumenta a medida que sube el contendo de Al extraíble en los horizontes A y B donde justamente se presentan los niveles más altos de materia orgánica.

La tendencia de la materia orgánica señalada en el cuadro 10, de subir a medida que aumenta la altitud y la precipitación y disminuye la temperatura, podría ser explicada en términos del balance entre la adición de residuos vegetales y su proceso de descomposición que resulta favorable a una gran acumulación de materia orgánica, por cuanto la mayor precipitación estimula mayor crecimiento vegetativo aún a grandes elevaciones donde la temperatura es baja y limita la actividad microbiológica responsable de la mineralización de la M.O; además, la mayor precipitación unida a la gran capacidad de retención de humedad de estos suelos, contribuye a que se mantengan altos niveles de humedad capaces de crear condiciones anaeróbicas en los microporos de las unidades estructurales que obviamente limitan también la actividad de los micro-organismos en el proceso de descomposición de la materia orgánica. Finalmente, la explicación dada acerca del efecto que el Al activo ejerce sobre la estabilización de la materia orgánica quedaría confirmada, pues de acuerdo con los coeficientes de correlación presentados en el cuadro 15, el Al extraíble tiende a aumentar a medida que se incrementan la altitud y la precipitación y baja la temperatura.

Cuadro 10. Correlaciones entre la materia orgánica y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	0,368**	0,14	0,396	--	-0,227	--
Temperatura	-0,343**	0,12	-0,333	--	0,321	--
Precipitación	0,336**	0,11	0,426*	0,18	0,129	--
Meses secos	-0,368**	0,14	-0,442*	0,20	-0,153	--
Declive	0,261*	0,07	0,156	--	-0,430	--
Material Parental	-0,060	--	0,173	--	-0,664*	0,44
Grado de des.	0,024	--	0,028	--	-0,689*	0,47
% de arena	-0,435**	0,19	-0,127	--	-0,652*	0,43
% de limo + arcilla	0,435**	0,19	0,127	--	0,652	0,43
Nitrógeno total	0,966**	0,93	0,911**	0,83	0,901**	0,81
Relación C/N	-0,004	--	-0,058	--	0,574	--
Fe ₂ O ₃	0,134	--	0,193	--	0,254	--
P disponible	0,183	--	-0,230	--	-0,402	--
Al extraíble	0,641**	0,41	0,877**	0,77	-0,007	--
Alofana	-0,098	--	0,296	--	0,125	--
CIC Total	0,702**	0,49	0,399	--	0,843**	0,71
CIC fr. mineral	0,020	--	0,016	--	0,797**	0,64
Ca cambiable	-0,085	--	-0,553**	0,31	0,653*	0,43
Mg cambiable	-0,099	--	-0,494	--	-0,188	--
K cambiable	0,012	--	0,111	--	0,602*	0,36
% Sat. de Bases	-0,530**	0,28	-0,810**	0,66	-0,185	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad

Horizonte A n = 60

Horizonte B n = 23

Horizonte C n = 11

La tendencia de la materia orgánica de aumentar a medida que los meses secos disminuyen y el declive es mayor, se explica por la asociación de estas variables con la precipitación y la altitud respectivamente (cuadro 3).

Los coeficientes de correlación altamente significativos encontrados al correlacionar la materia orgánica y el nitrógeno total en los horizontes A, B y C (cuadro 10), señalan con elevados índices de asociación que el N total está estrechamente relacionado con la materia orgánica. Esto sugiere que la mineralización del nitrógeno es muy limitada a través de todo el perfil, por los motivos expuestos anteriormente al explicar el porqué de los altos contenidos de materia orgánica en estos suelos.

El efecto de la materia orgánica sobre la capacidad de intercambio catiónico (CIC) es evidente, pues como lo indican los valores de "r" encontrados al correlacionar el contenido de M.O y la CIC (cuadro 10), esta última tiende a ser mayor a medida que aumenta la materia orgánica debido a su alta CIC y a los elevados niveles en que se le encuentra. Sin embargo, la tendencia sólo se muestra en los horizontes A y C, no así en el horizonte B. La razón de este sesgo en la tendencia podría ser un tipo de arcilla 2:1 de alta CIC acumulada en el horizonte B, que interfiere y anula el efecto de la materia orgánica, como el sugerido al explicar el porqué del incremento de la fracción arcilla en el horizonte B (cuadro 5).

Al correlacionar la materia orgánica con el porcentaje de saturación de bases se encontraron valores de "r" negativos y con alta

significancia estadística, los cuales indican que en los horizontes A y B, a medida que aumenta el contenido de materia orgánica disminuye el porcentaje de saturación de bases (cuadro 10). Este comportamiento es explicable, ya que como la saturación de bases es una función inversa de la CIC al suponer constante el contenido de bases, es de esperarse que la materia orgánica al incrementar la CIC haga bajar el porcentaje de saturación de bases en los horizontes superiores y no así en el horizonte C donde la influencia de la materia orgánica no se produjo por su insignificante contenido.

La tendencia mostrada por el contenido de Ca cambiabile en el horizonte B de aumentar a medida que baja el contenido de M.O, parece estar relacionado con el complejo organo-mineral del suelo, donde el catión Ca^{++} puede servir como puente de enlace, de manera que al disminuir la materia orgánica habrá menor formación de tal complejo y consecuentemente la demanda del catión tiende a disminuir para permanecer activo en el enjabre de intercambio iónico.

En el horizonte C el contenido de materia orgánica correlacionó significativamente con el material parental, el grado de desarrollo, la CIC de la fracción mineral y el contenido de Ca y K cambiables. Los valores de "r" (cuadro 10), indican que la materia orgánica tiende a disminuir a medida que el material parental se torna más oscuro y el grado de desarrollo es más avanzado, y que la CIC de la fracción mineral y los contenidos de Ca y K cambiables tienden a aumentar al incrementarse el contenido de materia orgánica.

Las demás características consideradas en este análisis de correlación (cuadro 10), no mostraron ningún grado de asociación estadísticamente significativo.

4.1.2.2.3 Nitrógeno Total

El contenido de nitrógeno total en los horizontes A, B y C varió alrededor de las medias 0.40, 0.13 y 0.01 por ciento con desviaciones típicas de 0.32, 0.10 y 0.00 respectivamente. La media 0.40[±]0.32% del horizonte A refleja semejanza con el ámbito de variación encontrado en andosoles de México (1), y al ser comparada con el límite de adecuancia (0.20%) señalado por Hardy (28), da idea de que se trata de suelos bien provistos de nitrógeno. sin embargo, vale recordar que puede tratarse de niveles de nitrógeno no disponible por causa de la ya discutida estabilidad de la materia orgánica.

En general, el contenido medio de nitrógeno total en todos los horizontes y el valor de "r" encontrado al correlacionar el contenido de N total y la profundidad del perfil (cuadro 6), señalan claramente que el nitrógeno total tiende a bajar a medida que aumenta la profundidad en el perfil, como era de esperarse en vista de su asociación con la materia orgánica que sigue la misma tendencia (cuadro 10).

Como consecuencia de esta estrecha asociación entre la M.O y el N total, los valores de "r" correspondientes a las correlaciones entre el nitrógeno total y los factores climáticos altitud, temperatura, precipitación y meses secos (cuadro 11) indican que éste al igual que la materia orgánica, tiende a incrementarse a medida que aumenta

Cuadro 11. Correlaciones entre el Nitrógeno total y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	0,299*	0,09	0,271	--	-0,074	--
Temperatura	-0,284*	0,08	-0,215	--	0,195	--
Precipitación	0,363**	0,13	0,354	--	0,048	--
Meses secos	-0,372**	0,14	-0,383	--	-0,042	--
Declive	0,228	--	0,074	--	-0,361	--
Grado de desarrollo	0,011	--	0,039	--	-0,576	--
Relación C/N	-0,180	--	-0,261	--	0,428	--
P disponible	0,081	--	-0,210	--	-0,359	--
Al extraíble	0,014	--	0,869**	0,76	-0,097	--
Alofana	0,003	--	0,333	--	-0,229	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

la altitud y la precipitación y disminuyen la temperatura y los meses secos. Un comportamiento similar se observó con respecto al contenido de Al extraíble en el horizonte B (cuadro 11), pues tanto la materia orgánica como el nitrógeno total tienden a ser mayores al aumentar el Al extraíble.

En relación con las otras variables consideradas, los valores de "r" no alcanzaron significación estadística.

4.1.2.2.4 Relación C/N

Las medias y sus correspondientes desviaciones típicas de la relación C/N en los horizontes A, B y C, presentadas en el cuadro 5 (13,78 \pm 3,22, 16,39 \pm 8,57 y 7,09 \pm 6,76 respectivamente), señalan la variación observada tanto en cada uno de los horizontes como a través de todo el perfil.

Estos valores indican que la relación C/N es alta en estos suelos, al igual que en los andosoles de Japón (6) y Nueva Zelanda (58). La explicación ofrecida para justificar esta alta relación C/N (6, 36), basada en el alto contenido de materia orgánica y el moderadamente alto contenido de nitrógeno, en forma directa parece no tener sentido en el caso de los suelos derivados de cenizas volcánicas de Centroamérica aquí estudiados, ya que estos suelos se encontraron con altos contenidos de materia orgánica y relativamente altos contenidos de nitrógeno total, pero la materia orgánica y el N total no correlacionaron con la relación C/N (cuadros 10 y 11), lo cual sugiere que esta última es independiente de aquellos.

De modo que la causa podría ser atribuída entonces, a la estabilidad de la materia orgánica y especialmente a la falta de mecanismos capaces de retener el nitrógeno mineralizado, señaladas como características de los andosoles (6, 36, 58), que unida a la fuerte lixiviación favorecida por la gran permeabilidad de estos suelos bajo condiciones de alta precipitación, tienden a bajar los niveles de nitrógeno para elevar la relación C/N.

El valor de "r" (-0.207) encontrado al correlacionar la relación C/N con la profundidad del perfil (cuadro 6), aunque significativo al nivel del 5% de probabilidad, señala pobremente la tendencia de la relación C/N de bajar al aumentar la profundidad, lo cual es explicado al observar las medias aritméticas presentadas en el cuadro 5, pues éstas indican que la relación C/N baja del horizonte A al horizonte C pero con un incremento pronunciado en el horizonte B, donde seguramente son más efectivos las aludidas causas que inducen el aumento de la relación C/N. Esto último parece confirmarlo el hecho de haber encontrado valores de "r" altamente significativos al correlacionar la relación C/N con la altitud, temperatura y declive (cuadro 12), pues indican que la relación C/N tiende a ser mayor al aumentar la altitud y la pendiente y disminuir la temperatura, precisamente en el horizonte B.

A excepción del grado de desarrollo, cuyo valor de "r" en el horizonte C señala la tendencia de la relación C/N de aumentar a medida que el grado de desarrollo es menor (cuadro 12), el resto de las variables mostraron ser independientes.

Cuadro 12. Correlaciones entre la Relación C/N y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	0,206	--	0,622**	0,39	-0,350	--
Temperatura	-0,166	--	-0,649**	0,42	0,533	--
Precipitación	-0,073	--	0,146	--	0,587	--
Meses secos	-0,013	--	-0,223	--	-0,532	--
Declive	0,089	--	0,421*	0,18	-0,526	--
Grado de desarrollo	0,003	--	-0,110	--	-0,695*	0,48
P disponible	0,081	--	-0,225	--	-0,463	--
Al extraíble	0,014	--	-0,049	--	0,243	--
Alofana	0,003	--	0,145	--	0,488	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

4.1.2.2.5 Óxidos libres de hierro

El contenido de óxidos libres de hierro en los andosoles es variable, pues mientras en suelos de Japón se han encontrado valores comprendidos entre 8 y 16% (34) y en suelos de Hawaii valores entre el 5 y el 38% (24, 56), en suelos de California y Oregon (EUA), dichos valores varían entre 0.4 y 7.3% (24).

La variación en el contenido de óxidos libres de hierro encontrada en los suelos derivados de cenizas volcánicas que motivan el presente estudio, es señalada por las medias y sus desviaciones típicas que se presentan en el cuadro 5. En el horizonte A se determinaron contenidos que variaron alrededor de $2.04 \pm 1.08\%$, en el horizonte B alrededor de $2.70 \pm 1.54\%$ y en el horizonte C alrededor de $0.42 \pm 0.14\%$. Estos valores son muy bajos si se comparan con los encontrados en Japón (34) y Hawaii (24, 56); sin embargo, resultan semejantes a los encontrados en California y Oregon (24). La causa de esta diferencia podría atribuirse a la posibilidad de que en aquellos los procesos de meteorización sean más intensos.

Tal como lo indica el coeficiente de correlación ($r = -0.225\#$) encontrado al correlacionar el contenido de Fe_2O_3 y la profundidad (cuadro 6), que a pesar de ser estadísticamente significativo da un coeficiente de asociación muy bajo (0.05), la tendencia del Fe_2O_3 a disminuir con la profundidad del perfil no es bien definida, pues si bien el contenido de óxidos libres de hierro baja entre los horizontes A y C, no sucede lo mismo entre el A y el B donde por el contrario se produce un incremento, posiblemente debido a la acumulación de

óxidos de hierro lixiviados del horizonte superior. En todo caso, sugiere que en general la meteorización es menos intensa a mayor profundidad.

Al correlacionar el contenido de Fe_2O_3 con algunas características de los sitios de muestreo y otras propiedades del suelo (cuadro 13), se encontraron valores de "r" estadísticamente significativos únicamente en las correlaciones con las variables material parental, grado de desarrollo, porcentaje de arena y porcentaje de limo + arcilla.

En relación con el material parental, al indicar el valor de "r" que el contenido de Fe_2O_3 tiende a aumentar a medida que el material parental se torna oscuro (ceniza volcánica negra) en el horizonte C, sugiere que ese material parental es más meteorizable a mayor profundidad; y en relación con el grado de desarrollo y los porcentajes de arena y de limo + arcilla, los valores de "r" señalan que el contenido de Fe_2O_3 tiende a ser mayor, principalmente en el horizonte A, a medida que el grado de desarrollo es más avanzado y a medida que el porcentaje de arena disminuye y el porcentaje de limo + arcilla aumenta haciéndose más fina la textura. Estas tendencias permiten inferir que el contenido de óxidos libres de hierro está estrechamente asociado con el grado de avance de los procesos de meteorización.

Con respecto a los factores climáticos y los topográficos asociados con aquellos, los valores de "r" resultantes del análisis de correlación no alcanzaron significación estadística (cuadro 13). Este hecho sugiere que el contenido de Fe_2O_3 varió similarmente en todos

Cuadro 13. Correlaciones entre el Fe_2O_3 y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	0,058	--	0,115	--	0,343	--
Temperatura	-0,103	--	-0,115	--	-0,393	--
Precipitación	0,039	--	0,040	--	0,068	--
Meses secos	0,022	--	-0,040	--	-0,074	--
Declive	0,136	--	0,269	--	0,397	--
Material Parental	-0,019	--	0,260	--	0,743**	0,55
Grado de desarrollo	0,345**	0,12	0,188	--	0,275	--
% de arena	-0,523**	0,27	-0,593**	0,35	0,576	--
% de limo + arcilla	0,523**	0,27	0,593**	0,35	0,576	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

los sitios, posiblemente debido a que el avance de la meteorización fue igualmente variable por causa de las deposiciones frecuentes de ceniza volcánica.

4.1.2.2.6 Fósforo Disponible

El contenido promedio de fósforo disponible determinado con el método de Bray y Kurtz (9), fue de 5.90, 1.20 y 3.76 ppm para los horizontes A, B y C respectivamente, con una variación dada por las desviaciones típicas ± 9.24 para el horizonte A, ± 1.55 para el horizonte B y ± 6.30 para el horizonte C.

Los valores correspondientes al horizonte A son similares a los encontrados en suelos superficiales de origen volcánico de América Central por Balerdi, Fassbender y Muller (4), quienes los conceptúan como bajos para explicar la grave deficiencia de fósforo de estos suelos.

La baja disponibilidad de fósforo reflejada en los valores encontrados, puede ser atribuida a la gran capacidad de fijación de fosfatos señalada como característica en los andosoles por varios investigadores (6, 36, 55), fosfatos que dentro de la variación de pH encontrada serían de aluminio en los suelos más ácidos y de hierro en los de pH mayor, pues los valores de "r" que se encontraron al correlacionar el P disponible con el aluminio extraíble y los óxidos libres de hierro (cuadro 14), indican con significación estadística que en el horizonte A el P disponible tiende a bajar al incrementarse el contenido de Al extraíble y de Fe_2O_3 .

Cuadro 14. Correlaciones entre el P disponible y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	-0,112	--	-0,103	--	-0,097	--
Temperatura	0,139	--	0,121	--	-0,054	--
Precipitación	-0,235	--	-0,081	--	-0,456	--
Meses secos	0,113	--	0,103	--	0,465	--
Declive	-0,212	--	-0,338	--	0,032	--
Material Parental	0,252*	0,06	0,196	--	0,698*	0,49
Grado de desarrollo	-0,165	--	-0,161	--	0,356	--
% de arena	0,162	--	0,015	--	0,531	--
% de limo + arcilla	-0,162	--	-0,015	--	-0,531	--
Fe ₂ O ₃	-0,285*	0,08	0,095	--	0,726*	0,53
Al extraíble	-0,250*	0,06	-0,207	--	-0,104	--
Alofana	-0,021	--	0,117	--	-0,269	--
CIC Total	-0,313*	0,10	-0,248	--	-0,349	--
CIC fr. mineral	-0,238	--	-0,174	--	-0,335	--
Ca cambiable	0,020	--	-0,172	--	-0,269	--

* Significativo al 5% de probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

El hecho de que en ambos sentidos de la variación del pH haya posibilidad de formación de fosfatos que al ser fijados limitan la disponibilidad de fósforo, sugiere el porqué de no haber encontrado tendencia con significación estadística al correlacionar el contenido de P disponible y el pH (cuadro 9).

Al correlacionar la CIC total con el P disponible se encontró un valor de $r = -0.313^*$ en el horizonte A, el cual indica que el P disponible tiende a disminuir al incrementarse la CIC total. Esta tendencia parece ser debida a un efecto indirecto del alto contenido de materia orgánica, pues ésta, a la vez que contribuye a elevar la CIC (cuadro 10), tiende a bajar el pH (cuadro 9) a niveles donde la actividad del aluminio se intensifica para dar lugar a la formación de fosfatos de aluminio que una vez fijados disminuyen la disponibilidad de fósforo.

Los valores de "r" estadísticamente significativos encontrados en los horizontes A y C al correlacionar el P disponible con el material parental (cuadro 14), indican que el contenido de fósforo disponible tiende a ser mayor cuando el material parental se torna más básico (ceniza volcánica negra). Esta tendencia tiene sentido porque se espera mayor disponibilidad de P a menor acidez, aún cuando en general éste último no fue detectado en el presente estudio.

La tendencia en la variación del P disponible con respecto a las otras características consideradas, no alcanzó los niveles estadísticamente significativos que hubieran sugerido alguna relación.

4.1.2.2.7 Aluminio Extraíble

En el cuadro 5 se presentan las medias de los contenidos de aluminio extraíble encontrados en los horizontes A, B y C. También se presentan las desviaciones típicas correspondientes a cada media para señalar la magnitud de la variación observada.

En el horizonte A se encontró un contenido de 4.46 ± 5.84 meq/100 g de suelo, en el horizonte B de 3.63 ± 4.07 meq/100 g de suelo y en el horizonte C de 1.19 ± 2.20 meq/100 g de suelo. Se nota pues, que tanto dentro como entre horizontes la variación fue amplia y con tendencia a disminuir al aumentar la profundidad; sin embargo, debe considerarse que dicha tendencia es sólo aparente, pues el valor de "r" correspondiente presentado en el cuadro 6 fue muy bajo y no alcanzó significación estadística.

Si estas medias se expresaran como porcentaje de Al_2O_3 , resultarían en contenidos muy bajos comparados con los que se determinaron en suelos de Japón (34) que oscilaron entre 19.6 y 30.8% de Al_2O_3 . Sin embargo, debe advertirse que como los métodos de extracción no son comparables, las diferencias anotadas no implican que los suelos aquí estudiados sean bajos en óxidos libres de aluminio, máxime si se consideran los resultados de Bornemisza e Igue (9), quienes con determinaciones directas de Al_2O_3 , encontraron en suelos volcánicos de Costa Rica valores comprendidos entre 13.2 y 20.3% que son tan altos como aquellos.

Haciendo la salvedad de que el Al "extraíble" incluye $Al(OH)_3$ y otros compuestos hidroxialumínicos además de Al cambiante (38), el

comportamiento del Al extraíble con respecto al pH discutido anteriormente (cuadro 9), coincide con los resultados de Popenoe para suelos de Guatemala (47), quien encontró relaciones estrechas entre el Al cambiante y el pH especialmente en suelos ácidos donde era mayor la concentración de aluminio.

En el análisis de correlación llevado a cabo para conocer la tendencia de la variación del contenido de aluminio extraíble con respecto a otras características del sitio y del suelo, se encontraron los valores de "r" y "r²" que se presentan en el cuadro 15.

Estos valores indican, con significación estadística que en los horizontes superiores el contenido de Al extraíble tiende a incrementarse a medida que aumentan la altitud, la precipitación, el declive, el porcentaje de limo + arcilla y los contenidos de Fe₂O₃ y alofana, y disminuyen la temperatura, los meses secos, el porcentaje de arena, el porcentaje de saturación de bases y los contenidos de Ca y Mg cambiables.

La tendencia mostrada por el Al extraíble con respecto a las características climáticas y topográficas de los sitios de muestreo, se explicó anteriormente con la asociación establecida entre la materia orgánica y el Al extraíble (cuadro 10), cuando se consideró la actividad del Al como responsable de la estabilidad de la materia orgánica.

La tendencia que el Al extraíble sigue en relación con la textura y el contenido de Fe₂O₃, sugiere que está relacionada con el grado de meteorización si se consideran los contenidos de limo + arcilla y de Fe₂O₃ como índices de meteorización.

Cuadro 15. Correlaciones entre el Al extraíble y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	0,523**	0,27	0,507*	0,26	-0,116	--
Temperatura	-0,528**	0,27	-0,467*	0,22	0,101	--
Precipitación	0,552**	0,30	0,477*	0,23	0,498	--
Meses secos	-0,566**	0,32	-0,514*	0,26	-0,367	--
Declive	0,644**	0,41	0,362	--	0,069	--
Material Parental	-0,209	--	0,282	--	-0,147	--
Grado de desarrollo	0,070	--	-0,006	--	0,283	--
% de arena	-0,377**	0,14	-0,133	--	0,180	--
% de limo + arcilla	0,377**	0,14	0,133	--	-0,180	--
Fe ₂ O ₃	0,304**	0,09	0,351	--	0,021	--
Alofana	0,112	--	0,477*	0,23	0,409	--
Ca cambiable	-0,366**	0,13	-0,568**	0,32	0,023	--
Mg cambiable	-0,306*	0,09	-0,454*	0,21	-0,237	--
K cambiable	-0,233	--	-0,010	--	-0,284	--
% sat. de Bases	-0,752**	0,57	-0,843**	0,71	-0,205	--

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad.

La tendencia con respecto al contenido de Ca y Mg cambiabiles y el porcentaje de saturación de bases resulta obvia si se considera la estrecha relación que Popenoe (47) encontró en suelos de Guatemala entre el Al cambiabile y el pH y la encontrada en este estudio entre el pH y el Al extraible (cuadro 9).

4.1.2.2.8 Capacidad de Intercambio Catiónico

En el cuadro 5 se presentan los promedios y sus desviaciones típicas correspondientes a los valores de la CIC total y de la fracción mineral, encontrados en los horizontes A, B y C.

La CIC total varió en el horizonte A alrededor de 33.76 ± 19.38 meq./100 g de suelo, en el horizonte B alrededor de 32.58 ± 13.80 meq./ 100 g de suelo y en el horizonte C alrededor de 9.33 ± 3.33 meq./ 100 g de suelo. Estos valores muestran que dentro horizontes la variación fue mediana y entre horizontes más amplia, especialmente entre los horizontes superiores y el horizonte C.

La tendencia de la variación observada entre horizontes, de disminuir a medida que aumenta la profundidad, la confirma el valor de "r" (-0.346^{***}) encontrado al correlacionar este par de variables (cuadro 6), aunque con un coeficiente de asociación bajo debido al escaso márgen de diferencia entre los horizontes A y B donde los valores de la CIC total son muy similares.

La CIC de los horizontes superficiales, coincide con el rango de variación señalado por Aguilera (1) para andosoles de México (15-60 meq./100 g de suelo). También coincide con la CIC encontrada para suelos de Japón (30-60 meq./100 g de suelo) según Kobo (36), cuando

se consideran los valores arriba de la media, y con la de los suelos de Chile que varía entre 14.9 y 29.7 meq./100 g de suelo (2), cuando se los considera por debajo de la media.

Se trata pues, de suelos con una CIC moderada como lo señala Wright (67) para andosoles de Sudamérica donde encontró valores comprendidos entre 20 y 40 meq./100 g de suelo.

Fueron estimados los valores de la CIC correspondiente a la fracción mineral, asumiendo que la materia orgánica contribuye a la CIC total, a razón de 2 meq./gramo de M.O como promedio (39). La variación de estos promedios fue alrededor de 15.84 ± 12.97 meq./100 g de suelo en el horizonte A, alrededor de 26.30 ± 12.65 meq./100 g de suelo en el horizonte B y de 8.80 ± 2.85 meq./100 g de suelo en el horizonte C. Aquí es notable la tendencia de tipo cuadrático de la variación entre horizontes, pues la CIC se incrementa fuertemente en el horizonte B para luego bajar en el horizonte C a un nivel inferior al del horizonte A.

La comparación por horizontes de las medias de la CIC total y de la fracción mineral, indica que la participación de la materia orgánica en la CIC total fue de 53.1 y 19.3 y 5.6% en los horizontes A, B y C respectivamente, y que la tendencia de la CIC total fue diferente a la mostrada por la CIC de la fracción mineral entre los horizontes A y B, pues mientras aquella mantuvo niveles similares (33.76 y 32,58 meq./100 g de suelo), ésta subió de 15.84 a 26,30 meq./ 100 g de suelo. Los porcentajes evidencian que la participación de la materia orgánica en la CIC total solamente fue considerable en el hori-

zonte A en correspondencia con los contenidos de M.O observados a través del perfil (cuadro 5). Sin embargo, los valores de "r" encontrados al correlacionar la CIC total y la M.O (cuadro 10), indican que la materia orgánica tuvo influencia sobre la CIC total de los horizontes A y C, pues revelan que se incrementa a medida que crece el contenido de M.O. En vista de que el contenido de materia orgánica en el horizonte C es muy pequeño comparado con el del horizonte A, la influencia de la M.O sobre la CIC total en el horizonte A podría atribuirse al efecto de la cantidad y en el horizonte C al efecto de la calidad considerando la posibilidad de un tipo de M.O de mayor actividad en complejo de adsorción.

De manera pues, que la CIC total del horizonte B, al no correlacionar con la materia orgánica y ser tan alta como la del horizonte A a pesar de su menor contenido de M.O, deberá ser atribuido al efecto de un mayor contenido de arcillas cristalinas y del tipo 2:1 de alta CIC, como se sugirió anteriormente al discutir la textura para explicar el incremento del porcentaje de la fracción arcilla observado en el horizonte B (cuadro 5), o bien, a la presencia de alofana, también de alta CIC, en horizontes enterrados, como lo señala el valor de "r" encontrado al correlacionar la CIC total y la alofana, el cual indica que en el horizonte B la CIC total se incrementa al aumentar el contenido de alofana (cuadro 16).

La CIC total y la CIC de la fracción mineral, también correlacionaron con la textura como puede verse en el cuadro 16. Los coeficientes de correlación altamente significativos aquí presentados, in

CUADRO No. 16: Correlaciones entre la Capacidad de Intercambio Catiónico y otras características.

	<u>CIC TOTAL</u>						<u>CIC FRACCIÓN MINERAL</u>					
	<u>Horiz. A</u>		<u>Horiz. B</u>		<u>Horiz. C</u>		<u>Horiz. A</u>		<u>Horiz. B</u>		<u>Horiz. C</u>	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	.267*	0.07	.141	-	-.079	-	.036	-	-.011	-	.067	-
Temper.	-.293*	0.09	-.136	-	.241	-	-.094	-	-.010	-	.232	-
Precip.	.276*	0.08	-.019	-	.295	-	-.003	-	-.199	-	.296	-
Mes.Sec.	-.238	-	-.007	-	-.237	-	.076	-	.177	-	-.228	-
Declive	.334*	0.11	.166	-	-.346	-	.213	-	.116	-	-.327	-
Mat.Paren.	.269*	0.07	.134	-	-.506	-	-.268	-	.074	-	-.479	-
G.Desarr.	.173	-	.019	-	-.710**	0.50	.186	-	.008	-	-.698**	0.49
% arena	-.695**	0.49	-.538**	0.29	-.665**	0.44	-.515**	0.27	-.534**	0.29	-.650**	0.42
% Limo	.743**	0.55	.573**	0.33	.572	-	.645**	0.42	.557**	0.31	.566	-
% arcilla	.137	-	.206**	-	.522	-	.208**	-	.210**	-	.483*	-
%limo+arc.	.695**	0.49	.538	0.29	.665**	0.44	.515	0.27	.534	0.29	.650	0.42
pH (H ₂ O)	-.241	-	-.077	-	-.744	0.55	.186	-	.131	-	-.737**	-
pH(CaCl ₂)	-.139	-	-.098**	-	-.572	-	.231**	-	.111**	-	-.562	-
Fe ₂ O ₃	.614**	0.38	.700**	0.49	.026	-	.739**	0.55	.683	0.47	.060	-
Al extr.	.716**	0.51	.529	0.28	.046	-	.378	0.14	.210	-	.044	-
Alofana	.212	-	.416**	-	-.078**	-	-.207	-	.329	-	-.097	-
CIC F.Min.	.715**	0.51	.923	0.85	.996	0.99	-	-	-	-	-	-

* Significativo al 5% de Probabilidad

** Significativo al 1% de Probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

dican que la CIC (total y de la fracción mineral) aumenta a medida que baja el porcentaje de la fracción arena y aumenta el de la fracción limo y la fracción limo + arcilla, independientemente de la fracción arcilla. Esto significa que hay actividad de cambio en la fracción limo, y que la suma de limo más arcilla es un criterio aceptable para señalar la fracción activa de estos suelos, confirmando así la a severación hecha al discutir la textura, de que en estos suelos la formación de pseudolimos explica la baja dispersibilidad de las arcillas y consecuentemente los altos niveles en el porcentaje de la fracción limo.

Los coeficientes de correlación presentados en el cuadro 16, indican también la estrecha relación encontrada entre la CIC y el contenido de Fe_2O_3 y Al extraíble. Esta relación al mostrar que la CIC se incrementa al subir el contenido de óxidos libres de hierro y aluminio extraíble en los horizontes A y B donde dicho contenido es mayor (cuadro 5), sugiere que los correspondientes hidróxidos de estos compuestos participan en el complejo de adsorción.

La tendencia mostrada por la CIC en el horizonte A, de incrementarse al aumentar la altitud, el declive y la precipitación y bajar la temperatura (cuadro 16), parece estar asociada con el contenido de materia orgánica y Al extraíble, por cuanto estas variables, igualmente relacionadas con la CIC, siguen la misma tendencia con respecto a los factores climáticos considerados.

En relación con el material parental se encontró un valor de "r" significativo al 5% de probabilidad en el horizonte A, al corre-

lacionarlo con la capacidad de intercambio catiónico (cuadro 16). Este valor indica que la CIC total tiende a ser mayor cuando el material parental es más claro (ceniza volcánica blanca), debido posiblemente a que por ser de tendencia más ácida propicie mayor acumulación de materia orgánica, la cual, como ya se discutió anteriormente, tiende a incrementar la CIC. Este efecto del material parental no se detectó con la CIC de la fracción mineral, a pesar de la estrecha relación encontrada entre las dos clases de CIC (cuadro 16), lo cual hace más válida la explicación ofrecida para justificar la tendencia del material parental con respecto a la CIC total.

4.1.2.2.9 Bases Cambiables

En el cuadro 5 se presenta el resumen de los resultados obtenidos en las determinaciones de las bases cambiables calcio, magnesio y potasio.

El contenido promedio de calcio fue de 9.65 meq./100 g de suelo con una desviación típica de ± 6.39 en el horizonte A, de 7.41 ± 6.48 meq./100 g de suelo en el horizonte B y de 4.33 ± 2.12 meq./100 g de suelo en el horizonte C. Estos valores, al igual que el valor de "r" encontrado al correlacionar el contenido de Ca con la profundidad (cuadro 6), indican que el contenido de calcio disminuye al aumentar la profundidad. Esta tendencia sugiere a primera vista un grado bajo de lixiviación, pero si observamos la media del horizonte C que es un valor comparativamente alto en relación con los valores promedios de los horizontes A y B, deberá pensarse también en un efecto de la frecuente deposición de cenizas volcánicas, común en los suelos del área

bajo estudio.

El contenido de calcio en el horizonte A resultó ligeramente mayor que el encontrado en suelos de cenizas volcánicas de California y Oregon (6 meq./100 g de suelo), pero muy inferior al encontrado en suelos de Hawaii (35 meq./100 g de suelo) (24).

En base al patrón de adecuancia establecido por Hardy (28) que es de 12 meq. de Ca/100 g de suelo, la variación observada en los horizontes A y B indica que la mayoría de los casos corresponde a suelos con un nivel bajo de calcio cambiabile.

El contenido de magnesio cambiabile en los horizontes A, B y C fue, respectivamente, de $2,02 \pm 1,68$, $2,28 \pm 2,46$ y $1,11 \pm 0,33$ meq./100 g de suelo.

Al ser investigada la tendencia lineal del contenido de Mg con respecto a la profundidad, no se encontró significancia estadística (cuadro 6), quizá debido al mayor contenido en el horizonte B que sugiere una tendencia de tipo cuadrático. Este mayor contenido de Mg cambiabile en el horizonte B posiblemente se debe al efecto de una lixiviación restringida a nivel de este horizonte o al efecto de horizontes enterrados por una capa de cenizas volcánicas recientes.

Al igual que el calcio, el contenido de Mg en los horizontes superiores, resultó mayor que el encontrado para los suelos de California y Oregon (1,2 meq./100 g de suelo) y menor que el encontrado en los suelos de Hawaii (7 meq./100 g de suelo) (24), y comparado con el nivel de adecuancia (3 meq./100 g de suelo) establecido por Hardy (28), resulta que la mayoría de los casos corresponde a suelos

con bajo contenido de magnesio cambiabile.

El contenido de potasio cambiabile fue de $1,61 \pm 1,24$, $1,72 \pm 1,00$ y $1,21 \pm 0,69$ meq./ 100 g de suelo en los horizontes A, B y C respectivamente. Como en el caso del Mg, no se detectó tendencia linear con respecto a la profundidad (cuadro 6) debido a un mayor contenido en el horizonte B que da idea de una correlación de tipo cua - drático. La razón dada para explicar la tendencia del magnesio con respecto a la profundidad, parece ser válida en el caso del potasio.

Aquí de nuevo se observa que los contenidos de potasio cambiabile son mayores que el señalado para los suelos de California y Oregon (1,0 meq./100 g de suelo), e inferiores al señalado para los suelos de Hawaii (6 meq./100 g de suelo) (24). Sin embargo, es evidente que se trata de suelos con alto contenido de potasio cambiabile, pues el patrón establecido por Hardy (28) como límite adecuado es de sólo 0,35 meq./100 g de suelo.

Los valores presentados, que señalan el contenido promedio de calcio, magnesio y potasio cambiabiles, ponen de manifiesto el predominio del calcio sobre el magnesio y el de éste sobre el potasio, como lo encontraron otros investigadores en andosoles de México (1) y del Japón (34).

En cuanto al balance de las bases cambiabiles en el complejo de adsorción, dado por las relaciones entre las bases divalentes y entre éstas y la monovalente, parece no ser adecuado si se compara con los patrones establecidos por Hardy (28).

La relación Ca/Mg encontrada fue de 5.05 ± 2.45 , 3.50 ± 1.89 y 4.03 ± 1.77 para los horizontes A, B y C respectivamente, y el óptimo señalado por Hardy (28) para esta relación en los horizontes superficiales es de 4. Esto sugiere que debe incrementarse el nivel de Mg para conseguir el balance adecuado, pero como en promedio el nivel de ambos cationes es bajo, el contenido de los dos habrá de ser incrementado pero cuidando de la proporcionalidad necesaria.

La relación Ca/K encontrada fue de 9.28 ± 9.11 , 6.38 ± 6.94 y 4.32 ± 2.08 en los horizontes A, B y C respectivamente, y el óptimo señalado por Hardy (28) es de 35. Aquí de nuevo se hace evidente el bajo contenido de calcio, pues como se discutió anteriormente el de K es alto.

La relación Mg/K encontrada fue de 1.79 ± 1.57 , 1.91 ± 2.40 y 1.50 ± 1.46 en los horizontes A, B y C respectivamente, y la señalada por Hardy (28) es de 3. Obviamente es necesario elevar el nivel de magnesio cambiabile para lograr el balance correcto.

La relación $Ca \pm Mg/K$ encontrada en los horizontes A, B y C fue respectivamente de 11.05 ± 10.49 , 8.30 ± 9.20 y 5.80 ± 3.29 . Como el óptimo señalado por Hardy (28) es una relación de 40, resulta evidente una vez más, que los cationes divalentes se encuentran por debajo del límite adecuado.

En el cuadro 17 se presentan los coeficientes de correlación y los correspondientes índices de asociación, encontrados al correlacionar las bases de cambio con algunos factores climáticos de los sitios de muestreo y con la textura del suelo en los horizontes A, B y C.

CUADRO No. 17: Correlaciones entre el Ca, Mg y K cambiables y otras características en los horizontes A, B y C.

	<u>CALCIO</u>			<u>MAGNESIO</u>			<u>POTASIO</u>		
	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>	<u>A</u>	<u>B</u>	<u>C</u>
Altitud	-.365 ^{**}	-.536 ^{**}	.173	-.458 ^{**}	-.392	.296	-.310 [*]	.320	-.288
Temperatura	.310 ^{**}	.467 [*]	-.103	.410 ^{**}	.374	-.342	.265 [*]	-.330	.369
Precipitac.	-.504 ^{**}	-.568	-.020	-.475 ^{**}	-.461 [*]	-.349	-.312 [*]	-.229	-.245
Meses Secos	.527 ^{**}	.596 ^{**}	.066	.494 ^{**}	.486 [*]	.420	.372 ^{**}	-.001	.292
Declive	.413 ^{**}	-.362	-.020	-.356 ^{**}	-.224	.259	-.337 ^{**}	.215	-.411
Mat. Parental	-.053	-.011	-.326	.023	.082	.651 [*]	-.099	-.168	-.665 ^{**}
G. Desarrollo	.125	.018	.385	.154	.038	.146	.105	-.164	-.554
% de arena	-.271 [*]	-.114	-.629 [*]	-.259 [*]	-.151	.152	-.431 ^{**}	-.044	-.814 ^{**}
% Limo+arc.	.271 [*]	.114	.629 [*]	.259 [*]	.151	-.152	.431 ^{**}	.044	.814 ^{**}
Fe ₂ O ₃	.259 [*]	.128	.017	.418 ^{**}	.180	.655 [*]	.385 ^{**}	-.017	-.362
CIC total	.285 [*]	.256	.798 [*]	.281 [*]	.339	.065	.206	.203	.681 ^{**}
Ca Cambiable	-	-	-	.810 ^{**}	.887 ^{**}	.283	.469 ^{**}	.067	.724 ^{**}
Mg Cambiable	.810 ^{**}	.887 ^{**}	.283	-	-	-	.499 ^{**}	.054	-.021
K Cambiable	.469 ^{**}	.067	.724 [*]	.499 ^{**}	.054	.021	-	-	-
Ca/Mg	.321 ^{**}	.180	.836 ^{**}	-.184	-.193	-.262	-.131	-.008	.703 ^{**}
Ca/K	.249 [*]	.660 ^{**}	-.042	.029	.606 ^{**}	.516	-.470 ^{**}	-.540 ^{**}	-.673 ^{**}
Mg/K	.209	.699 ^{**}	-.496	.247	.766 ^{**}	.504	-.436 ^{**}	-.437 [*]	-.776 ^{**}
Ca+Mg/K	.246	.678 ^{**}	-.275	.061	.655 ^{**}	.545	-.476 ^{**}	-.519 [*]	-.767 ^{**}

* Significativo al 5% de Probabilidad

** Significativo al 1% de Probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

Los valores de "r" estadísticamente significativos, encontrados especialmente en el horizonte A, indican que los contenidos de calcio, magnesio y potasio cambiables se incrementan al subir la temperatura y los meses secos, y bajar la altitud, el declive y la precipitación; y también al bajar el porcentaje de la fracción arena y subir el porcentaje de la fracción limo + arcilla y el contenido de Fe_2O_3 .

Esta tendencia nos sugiere que el contenido de bases cambiables está asociado con el grado de meteorización, el cual al ser más alto bajo condiciones de mayor temperatura y consecuentemente menor altitud, tiende a bajar el nivel de los minerales primarios para incrementar el de la fracción activa. Finalmente, la tendencia de las bases cambiables de subir a medida que disminuye la precipitación, también resulta obviamente explicable, ya que se espera menor grado de lixiviación a medida que disminuye la precipitación pluvial.

Los efectos del material parental sobre el contenido de bases cambiables, se detectó únicamente con el magnesio y el potasio en el horizonte C (cuadro 17), donde los valores de "r" indican que el Mg tiende a aumentar y el K a disminuir cuando el material parental es más oscuro y consecuentemente de naturaleza basáltica según los estudios de Weyl (67). Esta tendencia es obvia por cuanto los minerales melanocráticos son más ricos en Mg y los leucocráticos más ricos en K.

En relación con la CIC total, los valores de "r" indican que el contenido de Ca y Mg cambiables en el horizonte A y el contenido de Ca y K cambiables en el horizonte C, tiende a ser mayor al aumentar

la CIC total (cuadro 17). Esta tendencia puede ser explicada considerando la serie liotrófica o de Hofmeister, la cual señala que los cationes Ca y Mg tienen mayor capacidad de adsorción y por consiguiente mayor posibilidad de participar en el complejo a medida que aumenta la cantidad de cargas negativas en el coloide activo. Esta explicación no es válida en el caso del K sin embargo, debido a que aquí la tendencia mostrada parece depender de la ley de acción de masas si se considera la riqueza en K de los materiales volcánicos; o bien, al efecto de la baja CIC en el horizonte C, pues de acuerdo con Venema (65) los cationes monovalentes son más fuertemente adsorbidos cuando la CIC es baja.

Los valores de "r" encontrados al correlacionar entre sí los contenidos de Ca, Mg y K cambiables (cuadro 17), indican que se encuentran muy estrechamente asociados principalmente en los horizontes superiores, pues el contenido de cada uno de ellos tiende a incrementarse al aumentar el contenido de los demás, como resultado de la proporcionalidad que tienden a conservar en el complejo de intercambio.

La tendencia mostrada por las relaciones entre bases divalentes y entre éstas y la monovalente con respecto al contenido de cada uno de estos cationes cambiables señala, de acuerdo con los valores de "r" encontrados (cuadro 17), que la relación Ca/Mg tiende a ser mayor al incrementarse el contenido de Ca en los horizontes A y C y el contenido de K en el horizonte C; que la relación Ca/K aumenta al incrementarse el contenido de Ca en los horizontes A y B y el de Mg en el horizonte B, y disminuir el contenido de K en los hori-

zontes A, B y C; y que las relaciones Mg/K y $Ca \div Mg/K$ se incrementan al aumentar el contenido de Ca y Mg en el horizonte B y disminuir el contenido de K en los horizontes A, B y C. Estas tendencias son obvias para los casos en que se producen incrementos en el contenido de los que funcionan como denominador en cada relación considerada. La tendencia de la relación Ca/Mg mostrada con respecto al incremento del contenido de K en el horizonte C, de la relación Ca/K con respecto al incremento del contenido de Mg en el horizonte B y de la relación Mg/K con respecto al incremento del contenido de Ca en el horizonte A, parece tener explicación en la ya aludida proporcionalidad que estas cationes tienden a mantener entre sí, pues como puede observarse en el cuadro 5, las medias correspondientes al contenido de estas cationes cambiables, indican que el contenido de K en el horizonte C es mayor que el del Mg, el contenido de Mg en el horizonte B subió en una proporción mayor que el contenido de K con respecto a sus respectivos contenidos en el horizonte A, bajando así mismo el contenido de Ca, y finalmente, el contenido de Ca en el horizonte A es mucho mayor en este horizonte tanto en valor absoluto como en relación a los contenidos de Mg y K.

4.1.2.2.10 Porcentaje de Saturación de Bases

La variación observada en el porcentaje de saturación de bases se presenta resumidamente en el cuadro 5. En el horizonte A varió alrededor del $45.75 \pm 43.20\%$, en el horizonte B alrededor del $40.91 \pm 25.47\%$ y en el horizonte C alrededor del $72.18 \pm 18.40\%$. Estos porcentajes promedios y sus respectivas desviaciones típicas, indican que

la variación dentro horizontes fue mayor en el horizonte A, haciéndose progresivamente más pequeña a mayor profundidad en el perfil, y que la variación entre horizontes marcó una tendencia de aumentar con la profundidad, ligeramente interrumpida a la altura del horizonte B, tal como lo demuestra el valor de "r" encontrado al correlacionar estas variables (cuadro 6), que es bajo pero estadísticamente significativo. La causa de la variación observada parece estar asociada con el contenido de materia orgánica, cuya influencia sobre la CIC total ya fue discutida.

El caso de la variación dentro horizontes, puede ser explicada por la variación igualmente amplia del contenido de materia orgánica en los horizontes superiores (cuadro 5); y el caso de la variación entre horizontes se explica porque, al igual que el contenido de bases, el contenido de materia disminuye con la profundidad, pero en una proporción superior a la de las bases. De aquí que el porcentaje de saturación de bases amente, no sólo por haber disminuido la CIC total sino porque el contenido de bases disminuye en una proporción comparativamente más pequeña.

La explicación propuesta cobra mayor validez si se observan los valores de "r" encontrados al correlacionar el contenido de materia orgánica y la CIC total con el porcentaje de saturación de bases (cuadro 18), pues dichos valores indican que el porcentaje de saturación de bases tiende a aumentar al disminuir el contenido de materia orgánica y la CIC total. También debe considerarse la influencia de los óxidos libres de hierro, del $Al(OH)_3$ del Al extraíble y de la

Cuadro 18. Correlaciones entre el porcentaje de saturación de bases y otras características.

	Horizonte A		Horizonte B		Horizonte C	
	r	r ²	r	r ²	r	r ²
Altitud	-0,588**	0,35	-0,530**	0,28	0,213	-
Temperatura	0,560**	0,31	0,472*	0,22	-0,372	-
Precipitación	-0,721**	0,52	-0,483*	0,23	-0,651*	0,42
Meses secos	0,701**	0,49	0,515*	0,27	0,629*	0,40
Declive	-0,593**	0,35	-0,428*	0,18	0,389	-
Material Parental	0,145	-	0,053	-	0,160	-
Grado de desarrollo	-0,050	-	-0,087	-	0,395	-
% de arena	0,249	-	0,425*	0,18	-0,031	-
% de limo + arcilla	-0,249	-	-0,425*	0,18	0,031	-
pH (H ₂ O)	0,691**	0,48	0,634**	0,40	0,291	-
pH (Ca Cl ₂)	0,745**	0,56	0,686**	0,47	0,475	-
Materia orgánica	-0,530**	0,28	-0,810**	0,66	-0,185	-
Fe ₂ O ₃	-0,253	0,06	-0,501*	0,25	0,019	-
Al extraíble	-0,752**	0,57	-0,843**	0,71	-0,205	-
Alofana	-0,286*	0,08	-0,503*	0,25	-0,493	-
CIC Total	-0,460**	0,21	-0,574**	0,33	-0,157	-
CIC fr. mineral	-0,094	-	-0,286	-	-0,130	-
Ca cambiable	0,605**	0,37	0,561**	0,31	0,399	-
Mg. cambiable	0,484**	0,23	-0,457*	0,21	0,484	-
K cambiable	0,295*	0,09	-0,134	-	0,330	-
Relación Ca/Mg	0,236	-	0,335	-	0,138	-
Relación Ca/K	0,106	-	0,644**	0,41	0,103	-
Relación Mg/K	0,084	-	0,522*	0,27	0,018	-
Relación Ca + Mg/K	0,103	-	0,620**	0,38	0,071	-

* Significativo al 5% de probabilidad

** Significativo al 1% de probabilidad

Horizonte A, n = 60

Horizonte B, n = 23

Horizonte C, n = 11

alofana, ya que al igual que la materia orgánica, tienden a incrementar la CIC total y consecuentemente a bajar el porcentaje de saturación de bases, especialmente en los horizontes superiores donde su contenido es mayor. Esta influencia la confirman los correspondientes coeficientes de correlación presentados en el cuadro 18, los cuales indican que el porcentaje de saturación de bases tiende a ser mayor al disminuir el contenido de materia orgánica, Fe_2O_3 , aluminio extraíble y alofana.

De acuerdo con los valores promedios presentados en el cuadro 5, el porcentaje de saturación de bases puede considerarse como medio en los horizontes A y B y como alto en el horizonte C. Si se considera la desviación típica de la media en el horizonte A, que da un rango de variación muy amplio, se encuentran valores tan bajos como los encontrados en suelos de Nueva Zelanda (2-30%) (58) y tan altos como los encontrados en suelos de Hawaii (60-80%) (24).

Los valores de "r" encontrados al correlacionar el porcentaje de saturación de bases con la altitud, la temperatura, la precipitación, los meses secos y el declive (cuadro 18), indican que el porcentaje de saturación de bases tiende a bajar a medida que aumentan la altitud, el declive y la precipitación y disminuyen la temperatura y los meses secos, debido a que bajo esas condiciones la CIC total tiende a aumentar por efecto del incremento que también se produce en el contenido de los compuestos que influyen la CIC total (materia orgánica y Al extraíble), y a que como la precipitación aumenta y los meses secos disminuyen, también aumenta la lixiviación

de bases. Esto último se comprenderá mejor al observar los valores de "r" encontrados al correlacionar el porcentaje de saturación de bases con el contenido de Ca, Mg y K (cuadro 18), pues indican que el porcentaje de saturación de bases tiende a subir al aumentar el contenido de estos cationes.

Al correlacionar el porcentaje de saturación de bases con el pH determinado en H_2O y en $CaCl_2$ 0,01M, se encontraron coeficientes de correlación altamente significativos en los horizontes superiores (cuadro 18). Estos valores, al señalar la estrecha relación entre ambas variables, sugieren que están asociadas por lo menos en un 47% ($r = 0.691$) cuando el pH se determina en H_2O y en un 55% ($r = 0.745$) cuando el pH se determina en $CaCl_2$ 0,01M.

Los valores de "r" correspondientes a las relaciones Ca/K, Mg/K y Ca + Mg/K (cuadro 18), indican que en horizonte B el porcentaje de saturación de bases tiende a incrementarse al ser mayores dichas relaciones. Esta tendencia confirma que los cationes divalente son los que predominan en el complejo de intercambio por cuanto las relaciones mencionadas tenderán a ser mayores a medida que el contenido de K cambiante es menor y/o el contenido de Ca y Mg es mayor.

Tal como lo indican los coeficientes de correlación presentados en el cuadro 18, el material parental y el grado de desarrollo no tuvieron ninguna influencia sobre el porcentaje de saturación de bases, pues dichos coeficientes no alcanzaron niveles de significación estadística.

4.1.2.2.11 Alofana

De acuerdo con la génesis del coloide mineral activo señalada para estos suelos, en que la meteorización del vidrio volcánico genera una mezcla de alofana, haloisita, caolinita y gibsita con predominancia de la primera (5, 36, 55), resulta evidente que la alofana es el mineral secundario más importante.

En el presente estudio la alofana fue determinada semicuantitativamente en la totalidad de los suelos (cuadros 21, 24, 27 y 30) de acuerdo con el método de Fieldes y Perrott (23) y cuantitativamente en cuatro de los perfiles que se consideraron más representativos, siguiendo la técnica descrita por Jackson (33).

En el análisis semicuantitativo de alofana se encontró que en el horizonte A, 2 muestras no dieron color, 18 muestras dieron un color rosado, 27 muestras dieron un color rojo pálido, 12 muestras dieron color rojo y 1 muestra dio color rojo intenso. Esto sugiere que en este horizonte A, 2 suelos carecieron de alofana, 18 mostraron un contenido entre el 5 y el 7% y los 40 restantes con un contenido mayor del 7%. En el horizonte B, 4 suelos resultaron con un contenido de alofana entre el 5 y el 7% y 19 suelos con un contenido mayor del 7%; y en el horizonte C, 7 suelos resultaron con un contenido comprenido entre el 5 y el 7% y 4 suelos con un contenido mayor del 7%.

Con las limitaciones del método utilizado, se encontró que en general estos suelos muestran gran variabilidad en el contenido de alofana, posiblemente debido a diferencias en el material parental y a su distinto grado de meteorización.

En el cuadro 19 se presentan los resultados del análisis cuantitativo llevado a cabo en los cuatro perfiles seleccionados.

Los valores encontrados nos indican, que en el horizonte A el contenido de alofana varió entre 7.79 y 57.29%, con un promedio del 23,7%; en el horizonte B varió entre 2,18 y 27,31% con un promedio del 16.2%; y en el horizonte C varió entre 1,15 y 7,38% con un promedio del 4.3%. Estos valores nos indican que, en promedio, el contenido de alofana tendió a bajar al aumentar la profundidad en el perfil como consecuencia del menor grado de meteorización del vidrio volcánico en los horizontes inferiores, y en general, señalan una gran variabilidad del contenido de alofana en cada horizonte, confirmando lo observado en los resultados del análisis cualitativo considerada anteriormente. Estos valores están expresados con base al suelo entero, pero si se expresan como porcentaje de la fracción activa, el contenido de alofana aumenta hasta niveles que son generalmente mayores del 50%.

CUADRO 19. Contenido de alofana en 4 de los perfiles considerados más representativos del andosol típico

Perfil	Horizonte	Alof.Solub. %	Valor Delta meq.%	Alofana Total %
G-19	A ₁	10.89	46.40	57.29
	IIA ₁	8.47	22.20	30.67
	IIB	16.11	11.20	27.31
ES-2	A ₁	10.25	6.53	16.78
	A ₃	15.98	2.26	18.24
	B	1.02	1.16	2.18
	C	0.61	0.54	1.15
N-2	A ₁	3.59	4.20	7.79
	B	13.26	5.80	19.06
	C	6.85	0.53	7.34
CR-8	A ₁	9.94	11.49	21.43

Alofana total:

Horizonte	Mínimo	Máximo	Promedio
A	7.79	57.29	23.7%
B	2.18	27.31	16.2%
C	1.15	7.38	4.3%

4.2. DISCUSION DE RESULTADOS POR PAIS

Con el objeto de comparar la variabilidad de las más importantes propiedades físicas y químicas entre los suelos de cada país centroamericano, se discuten separadamente los resultados que se presentan en los cuadros 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30 y 31 y se resumen en el cuadro 32.

Las propiedades consideradas incluyen el color, el porcentaje de limo + arcilla, la textura, el pH determinado en H₂O, la capacidad de intercambio catiónico (CIC) total, el porcentaje de saturación de bases, la relación Ca + Mg/K y los contenidos de materia orgánica, nitrógeno total, óxidos libres de hierro, fósforo disponible, aluminio extraíble, alfa y de las bases cambiables Ca, Mg y K.

En la discusión de los resultados se hacen consideraciones sobre la variabilidad observada entre horizontes y dentro del horizonte A de cada país, y finalmente, entre países. También se considera dicha variabilidad, en relación a la altitud de los sitios de muestreo.

4.2.1 Suelos de Guatemala

4.2.1.1 Propiedades Físicas

En el cuadro 20 pueden observarse los resultados obtenidos en las determinaciones del color, en seco y en húmedo, del porcentaje de limo + arcilla y de la textura.

El color de estos suelos, determinado tanto en seco como en húmedo, correspondió en la mayoría de los casos, en los horizontes

ESTADÍSTICAS FÍSICAS DE LOS SUELOS DE GUATEMALA

Perfil Horizonte	Profund. cm	C O L O R		Distribución Porcentual de las Arenas			Limo %	Arcilla %	Limo + Arc. %	Textura		
		Seco	Húmedo	M. Gruesa	Gruesa	Media					Fina	M. Fina
G-19	0-100	10YR 4/2	10YR 2/1	3.0	4.3	5.9	4.5	22.0	77.0	1.0	78.0	Fr. Limoso
	100-200	10YR 5/3	10YR 3/4	1.0	4.9	7.8	5.8	21.8	37.2	41.0	78.2	Arcilloso
G-18	0-90	10YR 5/3	10YR 3/2	4.6	12.0	6.5	12.0	48.0	39.6	12.4	52.0	Fr. Arenoso
	90+	10YR 3/3	10YR 2/2	0.2	11.4	15.2	11.0	39.7	60.3	0.0	60.3	Fr. Limoso
G-17	0-20	10YR 5/3	10YR 2/2	0.3	19.4	26.3	20.0	69.5	16.2	14.3	30.5	Fr. Arenoso
	20-50	10YR 3/3	10YR 2/1	0.2	3.2	4.7	3.3	12.5	56.5	31.0	87.5	Arcilloso
	50+	2.5Y 4/4	10YR 2/2	0.4	6.6	9.3	6.9	24.4	60.6	15.0	75.6	Fr. Limoso
G-16	0-20	10YR 5/2	5Y 2/1	0.0	24.2	32.0	24.0	81.0	12.7	6.3	19.0	Ar. Franca
	20-50	10YR 4/3	10YR 4/1	0.0	3.1	5.0	3.5	12.0	88.0	0.0	88.0	Limoso
	50+	10YR 4/4	10YR 2/2	0.2	9.9	13.2	9.6	34.0	63.5	2.5	66.0	Fr. Limoso
G-3	0-90	10YR 3/2	10YR 2/1	0.7	16.2	21.9	16.5	80.5	9.9	9.6	19.5	Ar. Franca
	90-200	10YR 5/6	10YR 3/3	3.9	3.8	4.1	42.6	58.8	41.2	0.0	41.2	Fr. Arenoso
G-25	0-50	10YR 3/4	7.5YR2/0	41.0	0.5	0.9	0.7	71.2	21.8	7.0	28.8	Fr. Arenoso
	50+	2.5Y 3/2	2.5Y 2/0	1.6	8.5	10.8	8.2	84.2	15.8	0.0	15.8	Ar. Franca
G-26	0-50	10YR 4/2	5Y 2/1	33.3	3.2	4.3	3.0	85.0	10.5	4.5	15.0	Ar. Franca
	50+	2.5Y 5/4	5Y 3/2	22.3	8.3	10.5	8.2	78.7	20.3	1.0	21.3	Ar. Franca
G-1	0-25	10YR 3/3	10YR 2/2	0.3	4.1	4.2	22.0	31.6	41.0	27.4	68.4	Fr. Arcill.
	25+	10YR 3/4	10YR 3/2	0.5	5.8	8.2	6.0	23.2	32.0	44.8	76.8	Arcilloso
G-2	0-30	10YR 3/3	10YR 2/2	0.1	10.6	14.0	11.0	38.5	23.2	38.3	61.5	Fr. Arcill.
G-9	0-60	10YR 3/2	2.5YR2/0	8.1	5.6	7.9	5.9	44.6	48.6	6.8	55.4	Fr. Arenoso
	60+	10YR 5/4	10YR 3/2	0.1	14.0	19.0	14.0	70.2	15.3	14.5	29.8	Fr. Arenoso
G-11	0-60	10YR 4/2	5Y 2/1	3.9	9.8	12.8	9.5	54.5	45.5	0.0	45.5	Fr. Arenoso
G-8	0-30	10YR 5/2	10YR 2/2	2.8	12.1	16.0	12.5	52.5	28.0	19.5	47.5	Fr. Arenoso
Promedio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	50.5	-
Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	15.0	-
Máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.0	-
G-19	200+	10YR 6/4	7.5YR4/4	0.8	5.7	7.5	5.5	21.5	36.7	41.8	78.5	Arcilloso
G-3	200-300	10YR 6/4	10YR 4/4	13.1	10.4	14.7	11.0	69.2	27.3	3.5	30.8	Fr. Arenoso
G-2	30-90	10YR 7/6	7.5YR5/6	1.5	3.7	3.4	29.5	41.2	43.3	15.5	58.8	Franco
	90+	10YR 6/4	7.5YR4/4	0.1	11.4	15.5	11.5	51.5	30.0	18.5	48.5	Fr. Arenoso
G-11	60-90	2.5Y 6/2	10YR 3/3	2.8	13.2	18.0	13.0	57.5	28.5	14.0	42.5	Fr. Arenoso
Promedio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	51.8	-
Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30.8	-
Máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.5	-
G-3	300	7.5YR5/0	7.5YR2/0	6.8	16.8	22.8	17.1	90.0	5.7	4.3	10.0	Arenoso
G-11	90+	10YR 7/3	10YR 6/4	0.0	18.3	24.5	18.0	66.0	23.2	10.8	34.0	Fr. Arenoso
G-8	30-90	10YR 7/3	10YR 6/6	1.4	6.0	7.1	36.1	54.2	41.1	4.7	45.8	Fr. Arenoso
	90+	10YR 8/3	10YR 6/4	2.1	14.8	19.9	14.6	59.0	24.8	16.2	41.0	Fr. Arenoso
Promedio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	32.7	-
Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	10.0	-
Máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45.8	-

A, B y C, a un matiz o "hue" 10YR. En el horizonte A el "value" y la "chroma" en seco, variaron de 3 a 5 y de 2 a 6 respectivamente, y en húmedo, variaron de 2 a 4 y de 0 a 4 respectivamente.

En el horizonte B el "value" y la "chroma" variaron de 6 a 7 y de 3 a 4 en seco, y de 3 a 5 y de 3 a 6 en húmedo, respectivamente. En el horizonte C la variación observada para el "value" y la "chroma" fue de 5 a 8 y de 0 a 3 en seco, y de 2 a 6 y de 0 a 6 en húmedo, también respectivamente.

La variabilidad observada en los valores correspondientes al "value" y la "chroma" indican que el color de estos suelos tendió a ser más oscuro cuando la determinación se hizo en húmedo y a ser más claro a mayor profundidad en el perfil, debido especialmente al menor contenido de materia orgánica. En relación con la altitud la variación no mostró tendencia alguna.

El porcentaje de limo + arcilla varió de 15 a 88% con un promedio de 50.5% en el horizonte A, de 30.8 a 78.5% con un promedio de 51.8% en el horizonte B y de 10 a 45.8% con un promedio de 32.7% en el horizonte C. De acuerdo con estos valores promedios, se observa que la textura es similar en los horizontes A y B y más gruesa en el horizonte C, como consecuencia de una meteorización menos intensa en este último. Los valores mínimo y máximo, dejan ver que la variación fue más amplia en el horizonte A debido a los valores tan bajos observados en los suelos localizados a elevaciones intermedias, donde la textura es evidentemente más gruesa. La razón de estos valores bajos puede ser atribuida a la deposición reciente de

cenizas volcánicas, pues corresponden a perfiles ubicados en las cercanías de dos volcanes todavía activos (figura 1).

4.2.1.2 Propiedades Químicas

En el cuadro 21 se observan los resultados obtenidos en las determinaciones de pH en H₂O, materia orgánica, N total, Fe₂O₃, P disponible, aluminio extraíble y alofana, y en el cuadro 22 los correspondientes a las determinaciones de CIC total, Ca, Mg y K cambiables, porcentaje de saturación de bases y de la relación Ca + Mg/K.

La variación observada en el pH determinado en agua fue alrededor de 6.2 con un valor mínimo de 5.6 y un máximo de 7.0 en el horizonte A, alrededor de 6.5 (5.9-7.2) en el horizonte B y alrededor de 6.7 (6.5-7.1) en el horizonte C. En promedio estos valores señalan que el pH tiende a ser ligeramente más alto, al aumentar la profundidad en el perfil, al igual que la tendencia general mostrada por todos los suelos de la región (cuadro 6). La causa de esta tendencia puede atribuirse a una lixiviación de bases que parece ser acentuada por la frecuente deposición de cenizas volcánicas, y al efecto del Al extraíble que se encontró estrechamente asociado al pH (cuadro 9). Este mismo efecto se advierte también en los horizontes A localizados a elevaciones medianas donde los valores de pH son más altos en correspondencia con los más bajos contenidos de Al extraíble.

El contenido de materia orgánica varió de 3.68 a 26.38% con un promedio de 10.84% en el horizonte A, de 0.34 a 2.22% con un promedio de 0.27% en el horizonte C. Estos promedios muestran que el contenido de materia orgánica es alto en el horizonte A, y que tiene

CUADRO 21. Características químicas de los suelos de Guatemala

Perfil Horizonte	pH(H ₂ O)	pH(CaCl ₂)	M.O. %	N Total %	C/N	Fe ₂ O ₃ %	P dispon. ppm	Al extrai. meq. %	Alofana
G- 19	6.3	5.7	14.27	0.68	12	2.3	0.0	4.9	x
IIA1	6.5	5.9	4.21	0.14	17	2.8	1.1	3.7	xxx
A1	5.8	5.3	9.51	0.41	13	1.6	5.4	3.8	xx
IIA1	6.1	5.5	11.62	0.49	14	2.4	0.8	6.9	x
A1	5.6	5.0	6.16	0.33	11	1.0	1.0	6.3	xxx
IIA1	5.6	5.1	26.38	1.26	12	2.4	0.4	19.5	xx
IIA3	5.9	5.3	16.81	0.71	14	3.1	0.8	24.5	xx
A1	5.8	4.9	3.68	0.18	12	0.3	0.7	2.9	xx
IIA1	5.8	5.0	24.12	0.95	15	2.7	0.6	22.5	x
IIA3	6.3	5.0	11.82	0.53	13	3.4	0.5	25.1	xx
A1	6.9	5.5	5.57	0.32	10	1.0	7.8	1.8	xxx
IIA1	6.4	5.8	3.85	0.18	12	3.4	0.5	3.0	xxx
A1	6.9	5.2	15.00	0.69	13	1.3	14.7	2.3	xx
A3	6.9	5.8	10.22	0.37	16	0.9	13.2	1.8	xx
A1	6.6	5.9	13.26	0.49	16	0.4	17.9	0.9	xx
IIA1	7.0	5.9	5.07	0.17	17	1.1	1.8	3.3	xxx
A1	6.3	5.7	5.43	0.24	13	2.7	8.6	0.3	x
A3	6.3	5.6	4.40	0.18	14	2.6	1.0	0.6	x
A1	6.4	5.5	5.46	0.20	15	2.4	0.8	0.6	xx
A1	5.8	5.2	22.14	1.13	11	1.3	1.0	6.2	xx
IIA1	6.4	5.6	8.75	0.45	11	1.1	0.5	5.8	xxx
A1	6.1	5.6	13.49	0.81	10	1.2	2.9	3.2	xx
A1	5.9	5.3	8.12	0.45	11	1.3	3.2	1.7	xx
Promedio	6.2	-	10.84	0.49	-	1.9	3.7	6.6	-
Mínimo	5.6	-	3.68	0.17	-	0.3	0.0	0.3	-
Máximo	7.0	-	26.38	1.26	-	3.4	17.9	25.1	-
G- 19	6.4	6.0	1.42	0.02	48	3.0	0.0	2.3	xxx
G- 3	7.2	6.0	0.34	0.01	25	1.7	1.3	0.7	xx
G- 2	5.9	5.2	0.76	0.03	15	1.6	0.7	0.6	x
B21	6.2	5.3	1.31	0.06	13	1.3	0.8	0.5	x
B22	6.6	5.7	2.22	0.11	12	1.2	1.0	1.6	xx
B	6.5	-	1.21	0.08	-	1.8	0.8	1.1	-
Promedio	5.9	-	0.34	0.01	-	1.2	0.0	0.5	-
Mínimo	7.2	-	2.22	0.11	-	3.0	1.3	2.3	-
Máximo	7.1	6.0	0.00	0.00	0	0.6	3.8	0.6	x
G- 3	6.8	5.8	0.28	0.01	12	0.4	0.8	7.8	x
G- 11	6.5	5.8	0.49	0.02	12	0.5	1.1	0.7	xx
G- 8	6.6	5.5	0.32	0.01	21	0.3	0.9	0.5	xx
Promedio	6.7	-	0.27	0.01	-	0.4	1.6	2.4	-
Mínimo	6.5	-	0.00	0.00	-	0.3	0.8	0.5	-
Máximo	7.1	-	0.49	0.02	-	0.6	3.8	7.8	-

CUADRO 22. Características del complejo de adsorción de los suelos de Guatemala

Perfil	Horizonte	Cic.Total		Cic.fr.min. meq/100 g suelo	Ca	Mg	K	% S. Bases	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K
		53.6	25.1									
G-19	A1	53.6	25.1	19.40	1.47	0.63	40	13.2	30.8	2.3	33.1	
	IIA1	46.6	38.1	15.56	1.51	5.13	48	10.3	3.0	0.3	3.3	
G-18	A1	26.5	7.5	5.55	0.87	0.18	25	6.4	30.8	4.8	35.7	
	IIA1	46.5	23.3	10.63	1.27	0.77	27	8.4	13.8	1.7	15.5	
G-17	A1	17.2	4.9	1.76	0.22	0.18	13	8.0	9.8	1.2	11.0	
	IIA1	74.8	22.1	7.84	1.59	1.18	14	4.9	6.6	1.4	8.0	
	IIA3	83.8	50.1	12.39	1.92	0.28	17	6.5	44.2	6.9	51.1	
G-16	A1	8.2	0.8	1.47	0.49	0.53	30	3.0	2.8	0.9	3.7	
	IIA1	80.0	31.7	4.46	1.73	0.25	8	2.6	17.8	6.9	24.8	
	IIA3	77.8	54.2	0.12	0.09	0.13	0.4	1.3	0.9	0.7	1.6	
G-3	A1	11.5	0.4	5.58	0.69	0.71	61	8.1	7.9	1.0	8.8	
	IIA1	37.4	29.7	14.10	1.36	0.65	43	10.4	21.7	2.1	23.8	
G-25	A1	18.0	0.0	9.10	1.78	0.31	62	5.1	29.4	5.7	35.1	
	A3	17.3	0.0	11.94	1.59	0.33	80	7.5	36.2	4.8	41.0	
G-26	A1	11.3	0.0	7.06	1.49	0.38	79	4.7	18.6	3.9	22.5	
	IIA1	9.8	0.0	1.92	0.37	0.21	26	5.2	9.1	1.8	10.9	
G-1	A1	27.6	16.8	10.93	2.76	2.52	59	4.0	4.3	1.1	5.4	
G-2	A3	30.3	21.5	10.62	3.32	1.72	52	3.2	6.2	1.9	8.1	
G-9	A1	23.4	12.4	8.29	2.74	1.86	55	3.0	4.5	1.5	5.9	
	A1	48.3	4.0	8.09	1.43	0.67	21	5.7	12.1	2.1	14.2	
	IIA1	22.7	5.2	1.51	0.36	0.46	10	4.2	3.3	0.8	4.1	
G-11	A1	34.6	7.7	13.47	2.57	0.86	49	5.2	15.7	3.0	18.7	
G-8	A1	22.7	6.4	7.37	1.82	1.51	47	4.1	4.9	1.2	6.1	
Promedio	-	35.9	-	8.22	1.45	0.89	37.7	-	-	-	16.8	
Mínimo	-	8.2	-	0.12	0.09	0.13	0.4	-	-	-	1.6	
Máximo	-	83.8	-	19.40	3.32	5.13	80.0	-	-	-	51.1	
G-19	IIB	33.0	30.2	8.51	1.24	3.50	40	6.9	2.4	0.4	2.8	
G-3	IIB	27.9	27.2	10.92	3.94	3.06	64	2.8	3.6	1.3	4.9	
G-2	B21	29.2	27.7	7.66	4.76	2.61	52	1.6	2.9	1.8	4.8	
	B22	24.8	22.2	6.64	3.98	2.15	51	1.7	3.1	1.3	4.9	
G-11	B	17.8	13.4	7.24	0.89	0.66	49	8.1	11.0	1.4	12.3	
Promedio	-	26.5	-	8.19	2.96	2.40	51.2	-	-	-	5.9	
Mínimo	-	17.8	-	6.64	0.89	0.66	40.0	-	-	-	2.8	
Máximo	-	33.0	-	10.92	4.76	3.50	64.0	-	-	-	12.3	
G-3	IIC	7.7	7.7	4.54	1.49	0.64	86	3.1	7.1	2.3	9.4	
G-11	C1	9.6	9.0	4.47	0.84	0.65	62	5.3	6.9	1.3	8.2	
G-8	C1	13.4	12.4	3.75	1.14	1.39	47	3.3	2.7	0.8	3.5	
	C2	7.9	7.3	1.54	0.43	0.83	35	3.6	1.9	0.5	2.4	
Promedio	-	9.6	-	3.57	0.97	0.88	60.0	-	-	-	5.9	
Mínimo	-	7.7	-	1.54	0.43	0.64	35.0	-	-	-	2.4	
Máximo	-	13.4	-	4.47	1.49	1.39	86.0	-	-	-	9.4	

de a disminuir al aumentar la profundidad en el perfil. Esta tendencia puede explicarse también en términos del alto contenido de Al extraíble en el horizonte A, pues como se discutió anteriormente (cuadro 10), este elemento al igual que la alofana parecen formar complejos bastante estables con la materia orgánica resultando así en una descomposición orgánica lenta.

Aún cuando en general, se encontró que la materia orgánica tiende a incrementarse al aumentar la altitud (cuadro 10), en los suelos de Guatemala esta tendencia no fue definida.

El contenido de nitrógeno total varió alrededor del 0.49% con un mínimo del 0.17% y un máximo del 1.26% en el horizonte A, alrededor del 0.08% con un mínimo del 0.01% y un máximo del 0.11% en el horizonte B y alrededor del 0.01% con mínimo del 0% y un máximo del 0.02% en el horizonte C. De acuerdo con los patrones establecidos por Hardy (28), los valores encontrados en el horizonte A pueden ser considerados como altos, pero con reservas acerca de su disponibilidad por la gran estabilidad de la materia orgánica.

La estrecha asociación encontrada entre la M.O y el N total al discutir la variabilidad de estas propiedades en la totalidad de los suelos (cuadro 10), se observa también en los suelos de Guatemala (cuadro 21).

El contenido de óxidos libres de hierro fue de 1.9% (0.3-3.4%) en el horizonte A, 1.8% (1.2-3.0%) en el horizonte B y 0.4% (0.3-0.6%) en el horizonte C (cuadro 21). Estos valores, en comparación con los encontrados en suelos de Hawaii (5-38%) (24-56) y de Japón

(8-16%) (34), son bajos posiblemente debido a un grado de meteorización menos avanzado. Esta misma explicación puede aplicarse al hecho de que el contenido de Fe_2O_3 tiende a ser más bajo en el horizonte C.

En relación con la altitud, el contenido de óxidos libres de hierro no mostró ninguna tendencia, debido posiblemente a la falta de uniformidad en la edad del material parental.

El contenido de P disponible mostró una variación de 0 a 17.9 ppm con un promedio de 3.7 ppm en el horizonte A, de 0 a 1.3 ppm con un promedio de 0.8 ppm en el horizonte B y de 0.8 a 3.8 ppm con un promedio de 1.6 ppm en el horizonte C, reflejando así una tendencia a disminuir con la profundidad y una variabilidad más amplia en el horizonte A. Esto último se debe a que en los horizontes A localizados a elevaciones intermedias, se registraron contenidos de P disponible comparativamente muy altos (cuadro 21) en coincidencia con los valores más bajos de Al extraíble y de Fe_2O_3 y los valores más altos de pH. De aquí que pueda considerarse obvia la tendencia observada, pues como se discutió anteriormente (cuadro 14) el P disponible se encontró asociado al contenido de Al extraíble y de Fe_2O_3 , y el Al extraíble asociado al pH (cuadro 9).

En comparación con los resultados obtenidos por Balerdi, Fassbender y Muller (4) en suelos superficiales de Centroamérica, los valores encontrados en los horizontes A son igualmente bajos.

El contenido de aluminio extraíble varió alrededor de 6.6 meq.% (0.3-25.1) en el horizonte A, alrededor de 1.1 meq.% (0.5-2.3) en el horizonte B y alrededor de 2.4 meq.% (0.5-7.8) en el horizonte

C. Estos valores promedios señalan que el contenido de Al extraí - ble es menor en los horizontes inferiores, al igual que la tendencia mostrada por la totalidad de los suelos (cuadro 6). La explicación puede estar en la alta retención de Al por la materia orgánica y en una menor meteorización en los horizontes inferiores.

La variabilidad del contenido de Al extraíble observada en el horizonte A es menor en los perfiles localizados a elevaciones bajas y mayor en los horizontes localizados a mayor elevación.

En relación con el contenido de alúmina, las determinaciones se micuantitativas revelan un mayor contenido en el horizonte A, como reflejo del efecto de una meteorización más avanzada. Las determinaciones presentadas en los cuadros 19 y 32, hacen notar contenidos relativamente altos en el horizonte A (30.67-57.29%).

La CIC total varió de 8.2 a 83.8 meq.% con un promedio de 35.9 meq.% en el horizonte A, de 17.8 a 33.0 meq.% con un promedio de 26.5 meq.% en el horizonte B y de 7.7 a 13.4 meq.% con un promedio de 9.6 meq.% en el horizonte C. Estos valores señalan, por un lado, que la CIC total tiende a bajar al aumentar la profundidad en el perfil, tal como se observó en la generalidad de los suelos (cuadro 6), y por otro, que la variabilidad en el horizonte A fue bastante amplia como consecuencia del contenido igualmente variable de M.O y del efecto de las frecuentes deposiciones de cenizas volcánicas. Otra causa podría ser el efecto de arcillas del tipo 2:1 pues como se observa en el cuadro 22, los valores más altos de CIC total corresponden a horizontes A de perfiles enterrados.

Las bases cambiables Ca, Mg y K variaron alrededor de las medias 8.22 (0.12-19.40), 1.45 (0.09-3.32) y 0.89 (0.13-5.13) meq./100 g de suelo respectivamente en el horizonte A, alrededor de 8.19 (6.64-10.92), 2.86 (0.39-4.76) y 2.40 (0.66-3.50) meq./100 g de suelo respectivamente en el horizonte B y alrededor de 3.57 (1.54-4.47), 0.97 (0.43-1.49) y 0.88 (0.64-1.39) meq./100 g de suelo respectivamente en el horizonte C. A excepción del calcio que mantuvo niveles similares en los horizontes A y B para luego bajar en el horizonte C, el Mg y el K mostraron contenidos más altos en el horizonte B. Esta acumulación de bases en el horizonte B parece estar relacionada con el pH, cuyos valores son más altos en comparación con los del horizonte A, pues como lo asevera Birrell (6), la retención de cationes es restringida en un medio ácido.

En promedio el contenido de bases cambiables es bajo en el caso del Ca y el Mg y alto en el caso del K. Esto repercute en un balance no adecuado, tal como lo señalan los valores de la relación Ca + Mg/K (cuadro 22), cuyos promedios están por debajo del límite crítico establecido por Hardy (23).

El porcentaje de saturación de bases fue de 37.7% (0.4-80%) en el horizonte A, 51.2% (40-64%) en el horizonte B y 60% (35-86%) en el horizonte C. Como en la generalidad de los suelos (cuadro 6), aquí también se observa que el porcentaje de saturación de bases tiende a incrementarse al aumentar la profundidad, en correspondencia con la variabilidad de la CIC total, con la cual se encontró estar inversamente relacionada (cuadro 18) y con las bases cambiables.

Aquí de nuevo se observa que el porcentaje de saturación de bases varía ampliamente en el horizonte A debido al efecto de la CIC total igualmente variable. Con respecto a la altitud, el % de saturación de bases no mostró tendencia definida.

4.2.2 Suelos de El Salvador

4.2.2.1 Propiedades Físicas

En el cuadro 23 se presentan los resultados obtenidos en las determinaciones del color en seco y en húmedo, del porcentaje de limo + arcilla y de la textura.

El color predominante en estos suelos correspondió a un "hue" 10YR. En el horizonte A el "value" y la "chroma" en seco, variaron de 3 a 5 y de 2 a 3 respectivamente, y en húmedo, variaron de 2 a 3 y de 1 a 2 también respectivamente. En el horizonte B la variación observada en estas componentes del color ("value" y "chroma") fue en el orden expuesto, de 3 a 5 y de 3 a 4 en seco, y de 2 a 3 y de 2 a 4 en húmedo. En el horizonte C variaron de 6 a 8 y de 2 a 3 en seco; en húmedo el "value" varió de 4 a 5 y la "chroma" se mantuvo en 3 sin variación.

Aquí de nuevo se observa que el color fue más oscuro cuando se determinó en húmedo y que se torna más claro a mayor profundidad en el perfil debido al menor contenido de M.O en los horizontes inferiores. En relación con la altitud, la variación del color no mostró ninguna tendencia.

El porcentaje de limo + arcilla encontrado fue en promedio, de 60.6% (37.0-90.8), 45.5% (21.5-73.4) y 63.6% (43.0-78.0) en los hori-

Características físicas de los suelos de El Salvador

Fund.	Color		Distribución Porcentual de las Arenas			Arenita	Limo	Arcilla	Limo + Arc.	Textura		
	Seco	Húmedo	M. Gruesa	Gruesa	Media						% Fina	% M. Fina
- 30	10YR 4/2	10YR 2/1	0.0	0.9	12.6	16.5	12.2	42.2	45.3	12.5	57.8	Franco
+	10YR 3/3	10YR 3/2	0.0	0.9	13.6	17.9	13.1	45.5	44.0	10.5	54.5	Franco
- 30	10YR 5/3	7.5YR3/2	0.5	1.3	14.3	19.0	14.0	49.1	45.2	5.7	50.9	Fr. Arenoso
- 90	10YR 5/2	10YR 2/2	0.1	4.3	12.7	16.0	16.0	49.1	42.9	8.0	50.9	Fr. Arenoso
- 30	2.5Y 4/2	10YR 2/1	0.1	0.6	3.5	4.8	3.5	12.5	57.0	30.5	87.5	Fr. Arc. Limo
+	2.5Y 3/2	5YR 2/1	0.1	0.4	2.5	3.7	2.5	9.2	49.8	41.0	90.8	Arc. Limoso
- 50	2.5Y 4/4	7.5YR3/2	1.4	4.3	16.9	23.0	17.4	63.0	28.5	8.5	37.0	Fr. Arenoso
- 20	10YR 4/2	5YR 2/2	1.8	3.2	17.9	10.2	7.8	40.9	32.3	26.8	59.1	Franco
- 50	10YR 3/2	5YR 2/1	0.1	2.0	12.1	16.0	12.0	42.2	31.8	26.0	57.8	Franco
- 15	10YR 4/2	10YR 3/1	0.7	3.9	11.1	15.3	9.7	40.7	44.8	14.5	59.3	Franco
- 25	10YR 4/2	10YR 2/1	0.8	3.4	10.4	14.0	10.5	39.1	46.4	14.5	60.9	Franco
- 50	10YR 3/2	5YR 2/1	0.2	1.2	11.6	15.5	11.9	40.4	43.6	16.0	59.6	Franco
+	10YR 4/2	10YR 2/1	0.2	0.6	2.4	6.3	34.6	44.1	50.9	5.0	55.9	Fr. Limoso
- 30	10YR 3/2	10YR 2/1	2.8	9.5	14.7	19.7	14.5	61.2	34.8	4.0	38.8	Fr. Arenoso
- 50	10YR 4/2	10YR 2/1	1.0	1.9	8.5	11.1	8.2	30.7	48.8	20.5	69.3	Franco
+	10YR 4/3	10YR 2/2	1.5	2.5	10.0	13.0	9.5	36.5	49.2	14.3	63.5	Franco
- 15	2.5Y 5/2	10YR 3/2	0.2	0.4	6.9	9.5	7.0	24.0	62.0	14.0	76.0	Fr. Limoso
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	60.6	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	37.0	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90.8	-
- 150	10YR 5/3	10YR 3/4	2.0	9.9	19.6	27.0	20.0	78.5	20.5	1.0	21.5	Arena Fr.
+	10YR 5/4	10YR 3/4	4.2	5.3	13.1	17.9	13.1	53.6	37.2	9.2	46.4	Fr. Arenoso
+	10YR 3/3	5YR 3/3	0.6	1.5	7.5	9.7	7.3	26.6	37.2	36.2	73.4	Fr. Arcilloso
- 40	10YR 5/3	10YR 2/2	1.1	6.2	11.7	15.5	12.0	46.5	42.2	11.3	53.5	Franco
+	2.5Y 4/2	10YR 2/2	2.3	9.6	16.6	22.0	16.7	67.2	31.8	1.0	32.8	Fr. Arenoso
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	45.5	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	21.5	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	73.4	-
+	10YR 8/2	10YR 5/3	2.8	7.9	13.8	18.5	14.0	57.0	43.0	0.0	43.0	Fr. Arenoso
- 75	10YR 7/3	10YR 5/3	0.4	2.8	10.5	14.0	10.3	38.0	59.0	3.0	62.0	Fr. Limoso
40	10YR 6/3	10YR 4/3	0.3	1.1	8.1	11.0	8.5	29.0	58.0	13.0	64.0	Fr. Limoso
+	10YR 7/3	10YR 5/3	0.0	1.0	10.4	14.1	10.5	36.0	56.4	7.6	64.0	Fr. Limoso
+	2.5Y 7/2	10YR 5/3	0.1	0.2	6.4	8.7	6.6	22.0	71.5	6.5	63.6	Fr. Limoso
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	43.0	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	78.0	-

zontes A, B y C respectivamente. De acuerdo con estos valores se observa que la textura es similar en los horizontes A y C y más gruesa en el horizonte B, debido posiblemente a residuos de una estratificación previa.

En el horizonte A, la variación entre los valores mínimo y máximo fue mayor que la observada en los horizontes inferiores, debido posiblemente al efecto de la deposición reciente y no uniforme de cenizas volcánicas. Con respecto a la altitud, la textura no mostró ninguna tendencia de cambio.

4.2.2.2 Propiedades Químicas

En el cuadro 24 pueden observarse los resultados obtenidos en las determinaciones de pH en agua, materia orgánica, nitrógeno total, Fe_2O_3 , P disponible, aluminio extraíble y alofana, y en el cuadro 25, los correspondientes a las determinaciones de CIC total, bases cambiables, porcentaje de saturación de bases y de la relación Ca + Mg/K.

El pH determinado en agua fue, en promedio, alrededor de 6.4 en los tres horizontes considerados y el rango de variación observado en cada horizonte fue muy similar (5.9-6.9, 6.1-6.9 y 6.2-6.8). Esta falta de variabilidad en relación a la profundidad del perfil, puede atribuirse a la deposición frecuente de cenizas volcánicas, cuyo efecto ha compensado en los horizontes superiores la pérdida de bases por lixiviación.

El contenido de materia orgánica fue de 5.75%(2.47-11.55) en el horizonte A, de 1.36(0.30-2.29) en el horizonte B y de 0.36% (0-0.90) en el horizonte C. Como en la generalidad de los suelos (cuadro 6),

CUADRO 24. Características químicas de los suelos de El Salvador

Perfil	Horizonte	pH(H ₂ O)	pH(CaCl ₂)	M.O. %	N Total %	C/N	Fe ₂ O ₃ %	P dispon. ppm	Al extraí. meq. %	Alofana
ES- 1	A1	6.5	5.7	5.69	0.30	11	1.3	40.7	1.6	xx
ES- 2	A3	6.7	5.7	3.33	0.16	12	1.5	1.6	1.6	xx
ES- 6	A1	6.1	5.2	2.47	0.16	9	1.4	47.1	2.9	xx
ES- 8	A3	6.4	5.5	2.65	0.12	13	1.1	2.6	0.9	x
ES- 5	A1	6.7	6.1	10.63	0.39	16	3.0	20.8	1.7	x
ES- 12	IIA1	6.3	5.4	11.55	0.37	18	3.4	18.8	2.9	x
ES- 13	A1	6.4	5.5	2.81	0.14	12	1.7	4.7	3.7	xxx
ES- 9	A1	6.5	5.5	7.71	0.36	12	1.6	2.1	0.5	x
ES- 3	A3	6.6	5.9	4.52	0.19	14	1.9	0.9	0.5	x
ES- 20	A1	5.9	5.2	5.71	0.27	12	0.9	6.3	1.0	-
ES- 11	A1	6.0	5.3	6.95	0.28	14	0.4	19.3	1.3	x
Promedio	A1	6.6	5.8	8.62	0.38	13	1.5	13.3	2.7	xxx
Mínimo	IIA1	6.8	5.8	6.69	0.27	14	1.6	2.7	2.6	xxx
Máximo	A1	6.5	5.7	4.93	0.28	10	1.3	6.4	2.1	xx
ES- 2	A1	6.4	5.7	6.68	0.25	15	1.5	2.5	1.7	xxx
ES- 8	A3	6.9	5.9	3.14	0.11	16	1.7	6.6	1.3	xxx
ES- 5	A1	6.2	5.4	3.74	0.17	13	0.4	3.9	0.5	xxx
ES- 12	A1	6.4	-	5.75	0.23	-	1.5	11.8	1.7	-
ES- 3	-	5.9	-	2.47	0.11	-	0.4	0.9	0.5	-
Promedio	-	6.9	-	11.55	0.39	-	3.4	47.1	3.7	-
Mínimo	B	6.3	5.5	0.96	0.02	28	0.7	1.5	0.3	x
Máximo	IIB	6.4	5.5	1.45	0.08	10	3.1	1.3	2.9	xxx
ES- 2	IIB	6.5	6.0	2.29	0.10	14	3.4	0.4	0.8	xx
ES- 8	B	6.1	5.4	1.81	0.09	11	1.1	1.9	0.5	x
ES- 12	B	6.9	6.0	0.30	0.04	4	1.1	4.2	1.4	xxx
ES- 3	-	6.4	-	1.36	0.07	-	1.9	1.9	1.2	-
Promedio	-	6.1	-	0.30	0.02	-	0.7	0.4	0.3	-
Mínimo	-	6.9	-	2.29	0.10	-	3.4	4.2	2.9	-
Máximo	C1	6.8	5.7	0.00	0.00	0	0.3	2.3	0.3	x
ES- 2	C1	6.5	5.7	0.28	0.03	6	0.4	1.2	0.5	x
ES- 12	C1	6.3	5.5	0.90	0.05	10	0.4	2.3	0.5	x
ES- 13	C2	6.3	5.6	0.35	0.02	9	0.4	1.8	0.5	x
ES- 11	C1	6.2	5.5	0.28	0.02	8	0.3	1.0	0.5	x
Promedio	-	6.4	-	0.36	0.02	-	0.4	1.7	0.5	-
Mínimo	-	6.2	-	0.00	0.00	-	0.3	1.0	0.3	-
Máximo	-	6.8	-	0.90	0.05	-	0.4	2.3	0.5	-

CUADRO 25. Características del complejo de adsorción de los suelos de El Salvador

Perfil	Horizonte	Cic.Total	Cic.fr.min. meq/100 g suelo	Ca	Mg	K	% S	Bases	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca+Mg/K
ES- 1	A1	19.7	8.3	10.98	1.62	1.79	73	6.8	6.1	0.9	0.9	7.0
	A3	14.4	7.7	7.88	0.98	0.92	68	0.8	8.6	1.1	1.1	9.6
ES- 2	A1	11.3	6.3	4.73	0.97	0.72	57	4.9	6.6	1.4	1.4	7.9
	A3	13.9	8.6	7.11	1.62	0.41	66	4.4	17.3	4.0	4.0	21.3
ES- 6	A1	53.0	31.8	22.19	5.60	2.15	56	4.0	10.3	2.6	2.6	12.9
	IIA1	56.7	33.6	17.07	3.69	1.38	39	4.6	12.4	2.8	2.8	15.0
ES- 8	A1	15.3	9.6	4.44	0.86	1.48	44	5.2	3.0	0.6	0.6	3.6
ES- 5	A1	28.1	12.6	16.19	3.10	1.48	74	5.2	10.9	2.1	2.1	13.0
	A3	22.7	13.6	11.68	2.07	1.41	66	5.6	8.9	1.6	1.6	10.5
ES-12	A1	19.4	8.0	8.17	1.96	2.72	66	4.2	3.0	0.7	0.7	3.7
ES-13	A1	21.9	8.0	10.09	1.45	2.39	64	7.0	4.2	0.6	0.6	4.8
ES- 9	A1	28.1	10.9	12.90	1.78	2.03	59	7.3	6.4	0.9	0.9	7.2
	IIA1	29.5	16.1	13.11	1.61	1.36	55	8.1	9.6	1.2	1.2	10.3
ES- 3	A1	14.0	4.2	6.64	1.43	0.55	62	4.6	12.1	2.6	2.6	14.7
ES-20	A1	29.2	15.9	13.38	1.49	2.21	58	9.0	6.1	0.7	0.7	6.7
	A3	27.0	20.7	13.03	1.58	1.43	59	8.2	9.1	1.1	1.1	10.2
ES-11	A1	16.0	8.5	6.84	1.75	2.18	67	3.9	3.1	0.8	0.8	3.9
Promedio	-	24.7	-	10.97	1.97	1.56	60.8	-	-	-	-	9.6
Mínimo	-	11.3	-	4.44	0.97	0.41	39.0	-	-	-	-	3.6
Máximo	-	56.7	-	22.19	5.60	2.72	74.0	-	-	-	-	21.3
ES- 2	B	6.6	4.7	4.14	1.18	0.28	85	3.5	14.8	4.2	4.2	19.0
ES- 8	IIB	33.6	30.7	9.57	1.98	1.75	40	4.8	5.5	1.1	1.1	6.6
ES- 5	IIB	28.2	23.6	11.26	2.63	1.42	54	4.3	7.9	1.9	1.9	9.9
ES-12	B	14.9	11.3	6.55	1.20	1.78	64	5.5	3.7	0.7	0.7	4.4
ES- 3	B	6.6	6.0	4.43	1.00	0.27	86	4.4	16.4	3.7	3.7	20.1
Promedio	-	18.0	-	7.19	1.60	1.10	65.8	-	-	-	-	12.0
Mínimo	-	6.6	-	4.43	1.00	0.27	40.0	-	-	-	-	4.4
Máximo	-	33.6	-	11.26	2.63	1.75	86.0	-	-	-	-	20.1
ES- 2	C1	4.4	4.4	1.62	1.12	0.27	69	1.5	6.0	4.2	4.2	10.2
ES-12	C1	10.3	9.7	5.66	0.92	1.97	83	6.2	2.9	0.5	0.5	3.3
ES-13	C1	14.7	12.9	8.12	1.27	1.79	76	6.3	4.5	0.7	0.7	5.2
	C2	11.9	11.2	6.83	1.11	1.79	82	6.2	3.8	0.6	0.6	4.4
ES-11	C1	11.1	10.6	5.68	1.37	2.22	83	4.2	2.6	0.6	0.6	3.2
Promedio	-	10.5	-	5.58	1.16	1.61	78.6	-	-	-	-	5.3
Mínimo	-	4.4	-	1.62	0.92	0.27	69.0	-	-	-	-	3.2
Máximo	-	14.7	-	8.12	1.37	2.22	83.0	-	-	-	-	10.2

estos valores señalan que el contenido de M.O tiende a disminuir al aumentar la profundidad en el perfil.

El contenido de M.O en el horizonte A, cuya variación no mostró tendencia definida en relación a la altitud, puede considerarse de me dio a bajo. Estos niveles de M.O son explicables, no solamente por los bajos contenidos de Al extraíble como factor de estabilización, si no porque corresponden a suelos sometidos a cultivos intensivos donde la M.O ha tendido a perderse por efecto de la erosión.

El contenido de N total varió de 0.11 a 0.39% con un promedio del 0.23% en el horizonte A, de 0.02 a 0.10% con un promedio de 0.07% en el horizonte B y de 0 a 0.05% con un promedio de 0.02% en el horizonte C.

De acuerdo con el patrón establecido por Hardy (28), el contenido promedio de N total en el horizonte A, puede considerarse como ade cuado. Debido a su estrecha relación con la M.O, la variabilidad observada en los valores del contenido de N total, siguió la misma tendencia mostrada por aquella.

El contenido de óxidos libres de hierro fue de 1.5%(0.4-3.4), 1.9%(0.7-3.4) y 0.4%(0.3-0.4) en los horizontes A, B y C respectivamente. Estos valores revelan, por un lado, que el contenido de Fe_2O_3 es bajo, y por otro, que dicho contenido tiende a disminuir al aumentar la profundidad, pero con un ligero incremento en el horizonte B causado probablemente por lixiviación. Estos bajos contenidos de óxidos libres de hierro pueden ser considerados como índice de una meteorización poco avanzada.

En estos suelos no se encontró que el contenido de óxidos libres de hierro variara en relación a la altitud, pues dicho contenido fue muy similar en todos los horizontes A considerados.

El contenido de fósforo disponible fue de 11.8 ppm (0.9-47.1) en el horizonte A, de 1.9 ppm (0.4-4.2) en el horizonte B y de 1.7 ppm (1.0-2.3) en el horizonte C. Los promedios indican que el P disponible tiende a ser menor en los horizontes inferiores por efecto de la menor meteorización en dichos horizontes. La gran variación observada en el horizonte A, se debe a los altos contenidos de P disponible encontrados en dos de los perfiles localizados a mayor altitud. La causa de estos altos niveles de P disponible podría ser atribuida al efecto residual de una posible fertilización fosfatada llevada a cabo con anterioridad al muestreo.

El contenido de Al extraíble fue de 1.7 meq.%(0.3-2.9) en el horizonte A, de 1.2 meq.%(0.3-2.9) en el horizonte B y de 0.5 meq.%(0.3-0.5) en el horizonte C. La evidente tendencia de disminuir al aumentar la profundidad, parece estar relacionada con el contenido de M.O, ya que esta sigue la misma tendencia y es capaz de reaccionar con el Al para formar compuestos estables. También puede esperarse que se deba al efecto de una meteorización menos avanzada en los horizontes inferiores. La altitud parece no haber influenciado el contenido de Al extraíble, pues los valores encontrados variaron sin mostrar ninguna tendencia.

El contenido de alofana fue mayor en los horizontes superiores y en los horizontes A correspondientes a los perfiles localizados a

menor altitud. La tendencia de la variación aquí observada parece estar relacionada con el grado de meteorización, pues se espera que esta sea más intensa a menor profundidad y en los sitios de temperatura más alta, pero considerando que estos suelos están expuestos a frecuentes adiciones de cenizas volcánicas.

Los resultados de las determinaciones de a lofana en muestras del perfil ES2, señalan un contenido promedio del 17.51% (cuadro 32) que si se expresa como porcentaje de la fracción activa, resulta en un contenido mucho mayor.

La CIC total fue de 24.7 meq.% (11.3-56.7) en el horizonte A, de 18.0 meq.% (6.6-33.6) en el horizonte B y de 10.5 meq.% (4.4-14.7) en el horizonte C. Estos valores indican claramente que la CIC total tiende a bajar con la profundidad, debido al menor contenido de M.O y al menor grado de meteorización en los horizontes inferiores. La lativamente baja CIC total encontrada en el horizonte A, parece estar de acuerdo con el mediano contenido de M.O entrado en estos mismos suelos (cuadro 24).

La influencia de la M.O sobre la capacidad de intercambio catiónico fue manifiesta, ya que la CIC total promedio relativamente baja corresponde a un contenido de M.O también relativamente bajo y como se observa en los cuadros 24 y 25, los dos casos de más alta CIC total corresponden igualmente a los contenidos más altos de materia orgánica. A excepción de estos dos horizontes A, localizados a mayor elevación, la variación observada en el resto de los casos no mostró tendencia en relación a la altitud.

El contenido de bases cambiables en los horizontes A, B y C fue respectivamente, de 10.97 meq.% (4.44-22.19), 7.19 meq.% (4-43-11.26) y 5.58 meq.% (1.62-8.12) para el calcio; de 1.97 meq.%(0.97-5.60), 1.60 meq.%(1.0-2.63) y 1.16 meq.%(0.92-1.37) para el magnesio; y de 1.56 meq.%(0.41-2.72), 1.10 meq.%(0.27-1.75) y 1.61 meq.%(0.27-2.22) para el potasio. A excepción del potasio que mostró un contenido más alto en el horizonte C, las otras bases tendieron a bajar su contenido al aumentar la profundidad en el perfil, lo cual sugiere que el efecto de la lixiviación sólo se manifestó en el caso del K a partir del horizonte B.

En promedio únicamente el contenido de K cambiabile se encontró alto y por arriba del límite adecuado que señala Hardy (28). Al ser bajos los contenidos de Ca y Mg y alto el de K, el balance entre las bases divalentes y la monovalente dada por la relación $Ca + Mg/K$, resultó muy por debajo del óptimo señalado por Hardy (28), tal como lo muestran los valores de esta relación presentados en el cuadro 25.

De acuerdo con los valores que representan el contenido de bases cambiables en los horizontes A (cuadro 25), se observa que la altitud parece no haber influenciado dichos contenidos.

El porcentaje de saturación de bases fué de 60.8% (39.0-74.0), 65.8%(40.0-86.0) y 78.6%(69.0-83.0) en los horizontes A, B y C respectivamente. La tendencia de incrementarse al aumentar la profundidad, está de acuerdo con la tendencia inversa observada en la CIC total. La influencia de la CIC total sobre el porcentaje de saturación de bases, también se observa en los promedios de estas dos va-

riables, pues los relativamente altos porcentajes de saturación de bases corresponden a los relativamente bajos valores de CIC total.

Al igual que la CIC total, y el contenido de bases cambiables, el porcentaje de saturación de bases tampoco mostró tendencia definida de variación con respecto a la altitud.

4.2.3 Suelos de Nicaragua

4.2.3.1 Propiedades Físicas

En el cuadro 26, donde se presentan los resultados obtenidos en las determinaciones de las principales propiedades físicas de los suelos de Nicaragua, puede verse la variación encontrada en el color, el porcentaje de limo + arcilla y la textura.

El color determinado en seco correspondió a los "hues" 10YR y 7.5YR en el horizonte A, a 10YR, 7.5YR y 5YR en el horizonte B y a 10YR y 5Y en el horizonte C. En húmedo fue predominante el "hue" 5YR en los horizontes A y B. El "value" y la "chroma" del color determinado en seco, varió de 3 a 5 y de 2 a 4 respectivamente en el horizonte A y de 4 a 5 y de 4 a 8 respectivamente en el horizonte B; en el horizonte C, únicamente el "value" varió de 4 a 8, pues la "chroma" se mantuvo en 1. En húmedo variaron de 2 a 3 y de 1 a 2 en el horizonte A y de 2 a 6 y de 0 a 2 en el horizonte C; en el horizonte B el "value" se mantuvo en 3 y la "chroma" varió de 3 a 4. De acuerdo con estos resultados, se observa que el color de estos suelos tendió a ser más rojizo, en correspondencia con el más alto contenido de Fe_2O_3 (cuadros 27 y 32). También se observa, como en la generalidad

Características físicas de los suelos de Nicaragua

Fund. n.	Color		Distribución Porcentual de las Arenas				Limo %	Arcilla %	Limo+ Arc.%	Textura		
	Seco	Húmedo	M.Gruesa	Gruesa	Media	Fina					M.Fina	
- 30	7.5YR3/2	5YR 2/1	0.0	2.7	6.3	8.2	6.3	23.5	56.7	19.8	76.5	Fr.Limoso
- 90	7.5YR4/4	5YR 2/2	3.8	5.2	11.0	14.5	11.0	45.5	40.5	14.0	54.5	Franco
- 60	10YR 4/3	5YR 2/1	0.9	3.9	5.7	7.2	5.5	23.2	49.3	27.5	76.8	Fr.Arcilloso
+	7.5YR4/4	5YR 2/2	1.2	6.6	11.7	15.5	11.5	46.5	39.0	14.5	53.5	Franco
- 30	10YR 5/3	5YR 2/1	4.0	9.2	7.8	10.5	8.0	39.5	34.0	26.5	60.5	Franco
- 50	10YR 4/3	10YR 2/2	1.6	7.3	9.1	12.7	9.3	40.0	37.0	23.0	60.0	Franco
+	10YR 3/4	5YR 2/2	1.0	3.6	5.0	5.2	38.4	53.2	36.8	10.0	46.8	Franco
- 15	7.5YR4/4	5YR 3/2	0.4	4.0	7.6	10.5	7.5	30.0	25.9	44.1	70.0	Arcilloso
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	62.3	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	46.8	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	76.8	-
-200	7.5YR5/8	5YR 3/4	0.1	2.7	7.7	10.5	8.0	29.0	58.0	13.0	71.0	Fr.Limoso
- 50	10YR 5/4	5YR 3/3	7.1	8.6	10.9	14.5	11.0	52.0	28.2	19.8	48.0	Fr.Arenoso
+	5YR 4/6	2.5YR3/4	0.4	3.2	2.2	3.0	2.4	11.2	29.8	59.0	88.8	Arcilloso
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	69.3	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	48.0	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	88.8	-
+	10YR 4/1	2.5Y 2/0	22.2	25.9	11.6	15.3	11.4	86.4	13.1	0.5	13.6	Arenoso
+	5Y 8/1	5Y 8/2	7.5	21.3	13.1	17.2	13.3	72.4	27.6	0.0	27.6	ArenaFr.
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20.4	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	13.6	-
-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	27.6	-

de los suelos estudiados, que el color tiende a ser más oscuro al determinarse en húmedo y más claro al profundizar en el perfil, excepto al llegar al horizonte C donde los "chromas" son muy bajos (0 y 2) debido al color oscuro del material parental.

La similitud del color observada en horizonte A, parece coincidir con la estrecha variación altitudinal (100-300 m) y con los contenidos de materia orgánica y de óxidos libres de hierro (cuadro 27).

El porcentaje de limo + arcilla fue de 62.3%(46.8-76.8), 69.3% (48.0-88.8) y 20.4%(13.6-27.6) en los horizontes A, B y C respectivamente, lo cual indica que la textura fue similar en los horizontes A y B y menos gruesa que la del horizonte C, como consecuencia de un menor grado de meteorización en este último horizonte.

4.2.3.2 Propiedades Químicas

En los cuadros 27 y 28 se presentan los resultados obtenidos en las determinaciones de pH en agua, materia orgánica, N total, Fe_2O_3 , P disponible, Al extraíble, alofana, CIC total, bases cambiables (Ca, Mg y K), porcentaje de saturación de bases y la relación Ca + Mg/K.

Los valores de pH encontrados fueron alrededor de 6.8(6.2-7.3), 6.8(6.2-7.2) y 7.7(7.7-7.8) en los horizontes A, B y C respectivamente, lo cual indica que la reacción de estos suelos fue ligeramente ácida o casi neutra en los horizontes A y B y alcalina en el horizonte C. La variación observada con respecto a la profundidad parece estar relacionada con la lixiviación de bases del horizonte A al B y con el bajo contenido de Al extraíble en el horizonte C. Los altos valores de pH encontrados en los horizontes A y B son explicables, ya que corresponden

CUADRO 27. Características químicas de los suelos de Nicaragua

Perfil	Horizonte	pH(H ₂ O)	pH(CaCl ₂)	M.O. %	N Total %	C/N	Fe ₂ O ₃ %	P dispon. ppm.	Al extraí. meq. %	Alofana
N- 14	A1	6.9	6.1	8.10	0.33	14	3.6	3.0	0.7	x
	IIA1	6.8	6.1	2.67	0.12	13	4.2	0.5	1.6	x
N- 3	A1	6.8	5.9	6.97	0.30	13	2.9	3.5	1.4	xx
	A3	7.0	6.0	3.53	0.12	18	3.1	0.5	1.1	xx
N- 2	A1	7.3	6.8	7.86	0.39	12	1.7	2.4	0.7	xx
N- 5	A1	6.6	5.8	5.56	0.27	12	3.1	6.0	1.4	xx
	A3	7.0	6.0	2.23	0.11	12	3.1	0.8	1.3	xx
N- 15	A1	6.2	5.6	5.44	0.22	14	2.8	0.9	0.6	x
Promedio	-	6.8	-	6.04	0.23	-	3.1	2.2	1.1	-
Mínimo	-	6.2	-	2.23	0.11	-	1.7	0.5	0.6	-
Máximo	-	7.3	-	8.10	0.39	-	4.2	6.0	1.6	-
N- 14	IIB	7.2	6.2	0.90	0.04	15	5.6	0.0	2.6	xx
N- 2	B	7.0	6.0	2.48	0.12	12	2.0	0.5	1.3	xx
N- 15	IIB	6.2	5.7	2.58	0.15	10	2.6	0.9	1.4	xx
Promedio	-	6.8	-	1.99	0.10	-	3.4	0.5	1.9	-
Mínimo	-	6.2	-	0.90	0.04	-	2.0	0.0	1.3	-
Máximo	-	7.2	-	2.58	0.15	-	5.6	0.9	2.6	-
N- 14	IIC	7.7	6.3	0.00	0.00	0	0.7	22.5	0.9	x
N- 2	C	7.8	7.1	0.20	0.00	0	0.3	3.7	0.3	xx
Promedio	-	7.7	-	0.10	0.00	-	0.5	13.1	0.6	-
Mínimo	-	7.7	-	0.00	0.00	-	0.3	3.7	0.3	-
Máximo	-	7.8	-	0.20	0.00	-	0.7	22.5	0.9	-

CUADRO 28. Características del complejo de adsorción de los suelos de Nicaragua

Perfil Horizonte	Cic.Total		Cic.fr.min. meg/100 g suelo	Ca	Mg	K		% S Bases	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca+MgK
	54.4	38.2				26.04	8.04					
N-14	54.4	38.2	26.04	8.04	5.41	73	3.2	4.8	1.5	6.3		
IIA1	53.2	47.8	23.66	8.86	1.79	65	2.7	13.2	5.0	18.2		
A1	36.1	22.2	16.51	3.04	3.40	64	5.4	4.9	0.9	5.8		
A3	34.4	27.3	14.22	3.11	2.87	59	4.6	5.0	1.1	6.0		
A1	34.2	18.5	20.73	4.43	4.11	86	4.7	5.0	1.1	5.7		
A1	30.5	19.4	12.48	2.63	2.86	59	4.7	4.4	0.9	5.3		
A3	28.2	23.7	11.78	3.00	3.02	63	3.9	3.9	1.0	4.9		
A1	33.4	22.5	13.02	4.97	1.82	59	2.6	7.2	2.7	9.9		
Promedio	38.0	-	17.30	4.76	3.16	66.0	-	-	-	7.8		
Mínimo	28.2	-	11.78	2.63	1.79	59.0	-	-	-	4.9		
Máximo	54.4	-	26.04	8.86	5.41	86.0	-	-	-	18.2		
N-14	64.0	62.2	29.21	11.28	1.10	65	2.6	26.6	10.3	36.8		
N-2	33.5	28.5	14.29	2.03	2.34	56	7.0	6.1	0.9	7.0		
II B	37.2	32.0	11.39	4.71	1.86	48	2.4	6.1	2.5	8.7		
Promedio	44.9	-	18.30	6.00	1.77	56.3	-	-	-	17.5		
Mínimo	33.5	-	11.39	2.03	1.10	48.0	-	-	-	7.0		
Máximo	64.0	-	29.21	11.28	2.34	65.0	-	-	-	36.8		
N-14	6.5	6.5	2.65	1.62	0.38	72	1.6	7.0	4.3	11.2		
N-2	5.1	5.1	2.80	0.95	1.36	99	3.0	2.1	0.7	2.8		
Promedio	5.8	-	2.72	1.28	0.87	85.5	-	-	-	7.0		
Mínimo	5.1	-	2.65	0.95	0.38	72.0	-	-	-	2.8		
Máximo	6.5	-	2.80	1.62	1.36	99.0	-	-	-	11.2		

a contenidos de bases cambiables igualmente altos (cuadro 28). En relación a la altitud, la variación del pH no mostró tendencia, pues fue similar en todos los sitios muestreados.

El contenido de materia orgánica fue del 6.04%(2.23-8.10), 1.99% (0.90-2.58) y 0.10%(0-0.20) en los horizontes A, B y C respectivamente, lo cual evidencia claramente que el contenido de M.O tiende a disminuir al aumentar la profundidad en el perfil.

Estos valores revelan contenidos de M.O relativamente bajos, al igual que los encontrados en suelos de El Salvador, y la explicación dada para justificar los niveles de M.O observados en los suelos del país mencionado, también es válida en el caso de los suelos de Nicaragua. En relación con la altitud, la variación observada en el contenido de M.O no mostró tendencia alguna.

El contenido de N total fue de 0.23%(0.11-0.39), 0.10%(0.04-0.15) y de 0% en los horizontes A, B y C respectivamente. Estos promedios indican, como en el caso de la materia orgánica con la cual el N total está relacionado, que tiende a disminuir al aumentar la profundidad.

En el horizonte A el contenido promedio de N total está ligeramente por encima del nivel crítico establecidos por Hardy (28). Finalmente, se observa que la elevación no ejerció influencia sobre la variación observada en el contenido de N total.

El contenido de óxidos libres de hierro fue de 3.1% (1.7-4.2) en el horizonte A, de 3.4% (2.5-5.6) en el horizonte B y de 0.5% (0.3-0.7) en el horizonte C. Como puede observarse, el contenido de Fe_2O_3

fue ligeramente más alto en el horizonte B y mucho más bajo en el horizonte C, debido posiblemente al menor grado de meteorización en este último horizonte y a la acumulación en el horizonte B por efecto de la lixiviación.

El contenido de óxidos libres de hierro en los horizontes A y B, aunque todavía bajos en comparación con los encontrados en suelos de Hawaii (24, 56) y de Japón (34), resultaron ser los más altos en la región bajo estudio (cuadro 32). Esto permite inferir que de todos los suelos estudiados, son estos los que han sufrido un mayor grado de meteorización, en correspondencia con la mayor temperatura registrada en el área.

El contenido de fósforo disponible fue de 2.2 ppm (0.5-6.0), 0.5 ppm (0-0.9) y 13.1 ppm (3.7-22.5) en los horizontes A, B y C respectivamente. Aquí se observa que el P disponible baja en el horizonte B y se incrementa fuertemente en el horizonte C. La variación observada con respecto a la profundidad, parece estar asociada con el contenido de Al extraíble, pues éste es más bajo donde los valores de P disponible son más altos (cuadro 27). Sin embargo, para el alto contenido encontrado en uno de los horizontes C deberá considerarse como explicación adicional, la presencia de fosfatos activos, posiblemente de calcio, que en las condiciones de pH alto tienden a liberar P para aumentar su disponibilidad.

En el horizonte A no se encontró que la variación en el contenido de P disponible estuviera relacionada con los cambios de altitud.

El contenido de aluminio extraíble fue de 1.1 meq.%(0.6-1.6) en

el horizonte A, de 1.9 meq.%(1.3-2.6) en el horizonte B y de 0.6 meq.%(0.3-0.9) en el horizonte C. Estos valores señalan contenidos muy bajos de Al extraíble acordes con el contenido relativamente bajo de M.O. También señalan un contenido más alto en el horizonte B, explicable por corresponder a horizontes enterrados presumiblemente más meteorizados. El contenido más bajo encontrado en el horizonte C, revela por el contrario, un grado pobre de meteorización.

En el horizonte A, los contenidos de Al extraíble no mostraron variación con tendencia definida respecto a los cambios altitudinales, posiblemente debido al escaso margen con que varió la altitud.

El contenido de alofana fue similar en los tres horizontes, lo cual sugiere que se trata de suelos de meteorización avanzada en los horizontes superiores, donde gran proporción de alofana ha cristalizado dejando un remanente similar al contenido encontrado en el horizonte C, donde se espera que la meteorización es menos intensa.

Como se anota en el cuadro 32, el contenido promedio de alofana encontrado en el horizonte A fue del 13.42%.

La CIC total observada en estos suelos fue de 38.0 meq.%(28.2-54.4) en el horizonte A, de 44.9 meq.%(33.5-64.0) en el horizonte B y de 5.8 meq.%(5.1-6.5) en el horizonte C. Estos valores indican que la CIC total fue notablemente mayor en los horizontes A y B, en correspondencia con los más altos contenidos de la fracción limo + arcilla (cuadro 26) y de M.O y Fe_2O_3 (cuadro 27). Si se considera el contenido relativamente bajo de M.O, la también relativamente alta CIC observada en estos suelos, deberá atribuirse a un tipo de ar-

cilla 2:1 de alta CIC predominante en la fracción activa, pues no podría pensarse en alofana debido a su bajo contenido.

En las bases cambiables, el contenido de calcio varió alrededor de 17.30 meq.% (11.78-26.04), 18.30 meq.%(11.39-29.21) y 2.72 meq.% (2.65-2.80) en los horizontes A, B y C respectivamente, el contenido de magnesio, alrededor de 4.76 meq.%(2.63-886), 6.00 meq.%(2.03-11.28) y 1.28 meq.%(0.95-1.62), y el de potasio, alrededor de 3.16 meq.% (1.79-5.41), 1.77 meq.%(1.10-2.34) y 0.87 meq.%(0.38-1.36). A excepción del potasio, cuyo contenido promedio mostró una definida tendencia a disminuir con el aumento de la profundidad, el contenido de Ca y Mg tendió a incrementarse en el horizonte B para luego disminuir en el horizonte C. Los altos contenidos de bases cambiables encontrados en los horizontes superiores y la variación observada en relación a la profundidad, son índices de una meteorización avanzada bajo condiciones de lixiviación relativamente restringida.

El contenido de bases cambiables supera el límite crítico establecido por Hardy (28); sin embargo, el balance no es adecuado, como puede verse en los valores de la relación $Ca + Mg/K$ presentados en el mismo cuadro 28. Como la causa de este desbalance es el comparativamente muy alto contenido de K cambiabile, deberá pensarse entonces en incrementar los niveles de Ca y Mg para corregirlo.

El porcentaje de saturación de bases fue del 66.0% (59.0-86.0) en el horizonte A, de 56.3%(48.0-65.0) en el horizonte B y del 85.5% (72.0-99.0) en el horizonte C. Estos valores dejan ver que el porcentaje de saturación de bases es relativamente alto como consecuencia del

alto contenido de bases cambiables. También señalan que tiende a bajar en el horizonte B para luego subir en el horizonte C, en correspondencia con la variación observada en la CIC total, la cual es más alta en el horizonte B y muy baja en el horizonte C.

4.2.4 Suelos de Costa Rica

4.2.4.1 Propiedades Físicas

En el cuadro 29 se presentan los resultados obtenidos en las determinaciones del color, el porcentaje de limo + arcilla y la textura de los suelos de Costa Rica.

El color de estos suelos, tanto en seco como en húmedo, correspondió predominantemente a un "hue" 10YR en los horizontes A y B; sin embargo, también se observaron algunos suelos con un "hue" 5YR cuando el color fue determinado en húmedo, debido aparentemente al contenido de óxidos libres de hierro que fue más alto en dichos suelos. En el horizonte A, el "value" y la "chroma" en seco variaron de 3 a 5 y de 2 a 4 respectivamente y en húmedo de 2 a 3 y de 0 a 4. En el horizonte B, ambos componentes del color variaron de 3 a 6 en seco y de 2 a 4 en húmedo. Estos valores señalan "values" y "chromas" más bajos en las determinaciones en húmedo y más altos al aumentar la profundidad en el perfil, lo cual indica que el color tiende a ser más oscuro al determinarse en húmedo y más claro al profundizar en el perfil. La causa de esto último puede atribuirse al contenido de materia orgánica que sigue la misma tendencia de variación con respecto a la profundidad. En relación con la altitud, la variación del color no mostró

CUADRO 29. Características físicas de los suelos de Costa Rica

Perfil Horizonte	Profund. cm.	C o l o r		Distribución Porcentual de las Arenas			Limo %	Arcilla %	Limo + Arc. %	Textura			
		Seco	Húmedo	M. Gruesa	Gruesa	Mediar Fina					M. Fina		
CR- 36	0- 50	10YR 3/2	10YR 2/1	1.6	3.0	8.9	11.0	8.7	33.2	42.8	24.0	66.8	Franco
CR- 37	0- 55	10YR 4/2	5Y 2/2	0.2	0.4	3.5	4.5	3.5	12.0	57.6	30.4	88.0	Fr. Arc. Lim.
CR- 35	0- 50	10YR 3/3	10YR 2/2	0.3	0.3	0.7	1.6	13.1	16.0	67.0	17.0	84.0	Fr. Limoso
CR- 6	0- 15	10YR 4/1	10YR 2/1	0.0	0.3	23.2	30.3	22.7	76.5	18.4	5.1	23.5	Arena Fr.
	15 +	7.5YR 4/4	5YR 2/2	0.1	0.6	14.8	19.0	14.0	48.5	46.6	4.9	51.5	Fr. Arenoso
CR- 11	0- 40	10YR 4/4	10YR 3/4	0.4	1.1	1.0	1.5	1.2	5.2	48.8	46.0	94.8	Arc. Lim.
CR- 30	0- 100	2.5Y 3/2	2.5Y 2/0	0.1	0.4	0.8	1.5	0.2	3.0	91.0	6.0	97.0	Limoso
CR- 31	0- 25	10YR 4/3	5YR 2/2	0.1	0.2	0.4	0.5	0.3	1.5	34.0	64.5	98.5	Arcilloso
CR- 10	0- 40	7.5YR 5/4	5YR 3/2	13.0	20.4	9.1	12.5	10.0	65.0	28.0	7.0	35.0	Fr. Arenoso
CR- 8	0- 90	10YR 3/3	5YR 3/2	0.1	0.5	14.9	20.0	14.5	50.0	26.5	23.5	50.0	Fr. Arc. Ar.
CR- 41	0- 50	10YR 5/2	10YR 2/1	0.4	3.6	8.5	11.5	8.5	32.5	37.5	30.0	67.5	Fr. Arcill.
CR- 42	0- 40	2.5Y 4/2	5Y 2/2	1.6	6.3	9.6	12.5	9.5	39.5	54.0	6.5	60.5	Fr. Limoso
Promedio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	68.1	-
Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	25.5	-
Máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	98.5	-
CR- 36	50 +	10YR 5/3	10YR 2/2	0.6	2.4	13.0	17.5	12.0	45.5	41.8	12.7	54.5	Franco
CR- 37	55 +	10YR 5/4	10YR 3/3	0.8	1.8	6.9	9.0	6.7	25.2	68.8	6.0	74.8	Fr. Limoso
CR- 35	50 +	7.5YR 5/6	10YR 3/3	2.9	17.2	12.4	16.7	12.8	62.0	28.0	10.0	38.0	Fr. Arenoso
CR- 11	40 +	10YR 5/4	10YR 4/4	0.3	0.5	1.0	2.3	36.4	40.5	38.5	21.0	59.5	Franco
CR- 30	100 +	10YR 6/6	7.5YR 4/4	1.8	8.8	13.5	17.4	13.5	55.0	31.5	13.5	45.0	Fr. Arenoso
CR- 31	25 +	10YR 3/3	5YR 3/4	0.2	0.5	0.8	0.9	0.8	3.2	20.3	76.5	96.8	Arcilloso
CR- 10	40 +	5YR 5/4	5YR 3/4	0.3	1.5	2.3	4.1	3.3	11.5	35.5	53.0	88.5	Arcilloso
CR- 8	90 +	10YR 5/6	7.5YR 3/2	0.1	0.4	10.9	12.6	10.1	34.2	33.9	31.9	65.8	Fr. Arcill.
CR- 41	50 +	10YR 5/3	10YR 2/2	0.5	2.5	8.0	10.5	8.0	29.5	48.5	22.0	70.5	Franco
CR- 42	40 +	10YR 5/4	10YR 3/2	1.5	6.2	10.8	15.0	12.0	45.5	50.5	4.0	54.5	Fr. Limoso
Promedio	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	64.8	-
Mínimo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	38.0	-
Máximo	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	96.8	-

tendencia alguna.

El porcentaje de limo + arcilla fue de 68.1%(25.5-98.5) en el horizonte A y de 64.8%(38.0-96.8) en el horizonte B. Estos valores indican que la textura de los suelos de Costa Rica tendió a ser mediana a fina, como consecuencia, posiblemente, de un grado más avanzado en los procesos de meteorización. En los horizontes A los porcentajes más altos de esta fracción, correspondieron a suelos localizados a elevaciones medianas, quizá debido a su mayor edad y a la escasa influencia de cenizas recientes.

4.2.4.2 Propiedades Químicas

En los cuadros 30 y 31 se presentan los resultados correspondientes a las determinaciones de pH, M.O, N total, óxidos libres de hierro, P disponible, Al extraíble, alofana, CIC total, bases cambiables, porcentaje de saturación de bases y la relación Ca + Mg/K.

El pH varió alrededor de 5.7(4.6-6.7) en el horizonte A y alrededor de 6.0(5.2-6.8) en el horizonte B, lo que indica que se trata de suelos que varían de ligera a fuertemente ácidos, especialmente en el horizonte A, donde se registraron los más bajos valores de pH. Estos valores correspondieron a suelos localizados a la mayor elevación, en coincidencia con los más altos contenidos de Al extraíble. En el horizonte B, el pH tendió a ser ligeramente mayor, principalmente en los suelos localizados a menor altitud donde también se encontraron los valores más bajos de Al extraíble.

El contenido de materia orgánica fue de 13.96% (1.25-35.56) en el horizonte A y de 5.35%(1.85-10.24) en el horizonte B.

CUADRO 30. Características químicas de los suelos de Costa Rica

Perfil	Horizonte	pH(H ₂ O)	pH(CaCl ₂)	M.O. %	N Total %	C/N	Fe ₂ O ₃	P dispon. ppm	Al extraf. meq. %	Alofana
CR- 36	A1	4.6	4.2	19.47	0.47	24	1.9	1.4	8.6	XX
CR- 37	A1	4.7	4.3	16.02	0.66	14	1.5	0.8	10.0	XX
CR- 35	A1	5.7	4.9	30.79	1.32	14	3.0	1.4	14.0	XX
CR- 6	A1	6.3	5.2	1.25	0.02	30	0.4	23.9	0.7	XX
	IIA1	5.6	4.5	9.34	0.43	13	1.4	0.9	7.9	XXXX
CR- 11	A1	5.8	4.4	10.07	0.39	15	5.0	0.2	9.8	XXX
CR- 30	A1	5.7	5.2	35.56	1.78	12	2.0	1.7	8.4	X
CR- 31	A1	5.9	4.3	14.06	0.47	17	3.9	1.2	11.1	XX
CR- 10	A1	6.3	5.2	8.88	0.39	13	4.7	2.3	3.5	X
CR- 8	A1	5.8	5.3	8.03	0.31	15	1.9	4.9	1.9	XX
CR- 41	A1	5.9	5.5	5.62	0.23	14	1.4	0.9	0.2	X
CR- 42	A1	6.7	6.1	8.46	0.39	12	2.0	1.3	1.1	XX
Promedio	-	5.7	-	13.96	0.57	-	2.4	3.4	6.4	-
Mínimo	-	4.6	-	1.25	0.02	-	0.4	0.2	0.2	-
Máximo	-	6.7	-	35.56	1.78	-	5.0	23.9	14.0	-
CR- 36	B	5.2	4.7	8.48	0.23	22	1.7	0.4	7.5	XX
CR- 37	B	5.6	5.1	7.30	0.44	10	2.8	0.1	12.9	XXX
CR- 35	B	6.4	5.3	10.24	0.37	16	3.2	0.5	13.1	XX
CR- 11	B	5.7	4.7	4.06	0.14	17	6.1	0.1	7.2	XXX
CR- 30	B	6.4	5.5	5.49	0.21	15	2.2	1.1	9.5	XXX
CR- 31	B	5.5	4.2	5.13	0.16	18	4.3	0.4	8.5	XXX
CR- 10	IIB	6.1	5.1	3.60	0.14	15	5.9	6.3	4.1	XXX
CR- 8	IIB	6.5	5.8	1.85	0.06	17	3.2	3.7	0.7	XX
CR- 41	B	6.0	5.6	2.79	0.10	16	1.8	0.1	0.4	XX
CR- 42	B	6.8	6.1	4.54	0.18	14	2.6	0.3	2.3	XXX
Promedio	-	6.0	-	5.35	0.20	-	3.4	1.3	6.7	-
Mínimo	-	5.2	-	1.85	0.06	-	1.7	0.1	0.4	-
Máximo	-	6.8	-	10.24	0.44	-	5.9	6.3	13.1	-

CUADRO 31. Características del complejo de adsorción de los suelos de Costa Rica

Perfil Horizonte	Cic.Total	Cic.fr.min. meq/100 g suelo	Ca	Mg	K	% S Bases	Ca/Mg	Ca/K	Mg/K	Ca+MgK
CR-36	30.9	0.0	0.69	0.18	2.57	11	3.8	0.3	0.1	0.3
CR-37	42.6	10.6	1.20	0.45	0.84	6	2.7	1.4	0.6	2.0
CR-35	63.7	2.1	1.39	1.30	3.58	10	1.1	0.4	0.4	0.8
CR-6	2.3	0.0	0.57	0.18	0.20	41	3.2	2.9	0.9	3.8
IIA1	25.1	6.4	0.50	0.14	0.18	3	3.6	2.8	0.8	3.6
	43.4	23.3	0.43	0.33	0.81	4	1.3	0.5	0.4	0.9
CR-11	88.1	17.0	18.01	2.97	2.99	27	6.1	6.0	1.0	7.0
CR-30	42.0	13.9	0.85	0.68	3.35	12	1.3	0.3	0.2	0.5
CR-31	42.2	24.4	5.61	2.56	3.03	27	2.2	1.9	0.8	2.7
CR-10	26.4	10.3	8.09	1.77	1.59	43	4.6	5.1	1.1	6.2
CR-8	31.2	19.9	13.82	3.10	1.52	59	4.5	9.1	2.0	11.1
CR-41	33.2	16.3	14.00	2.59	2.54	58	1.0	5.5	1.0	6.5
CR-42	39.3	-	5.43	1.35	1.93	25.1	-	-	-	3.8
Promedio	2.3	-	0.43	0.14	0.18	3.0	-	-	-	0.3
Mínimo	88.1	-	18.01	3.10	3.58	59.0	-	-	-	11.1
Máximo	27.7	10.7	0.24	0.09	2.19	9	2.7	0.1	0.04	0.1
CR-36	58.2	43.6	0.27	0.16	0.77	2	1.7	0.4	0.2	0.6
CR-37	41.1	20.7	0.33	0.11	2.51	7	3.0	0.1	0.04	0.2
CR-35	41.3	33.2	0.61	0.36	0.55	4	1.7	1.1	0.7	1.8
CR-11	43.6	32.6	1.64	0.68	2.55	11	2.4	0.6	0.3	0.9
CR-30	34.3	24.1	0.48	0.21	0.64	4	2.3	0.8	0.3	1.1
CR-31	46.4	39.2	4.18	1.28	3.03	18	3.3	1.4	0.4	1.8
CR-10	28.2	24.5	7.88	2.74	0.43	39	2.9	18.3	6.4	24.7
CR-8	36.9	31.3	13.27	3.43	1.26	49	3.9	10.5	2.7	13.3
CR-41	34.3	25.2	9.70	2.51	2.90	44	0.9	3.3	0.9	4.2
CR-42	39.2	-	3.86	1.16	1.68	18.7	-	-	-	4.9
Promedio	27.7	-	0.24	0.09	0.43	2.0	-	-	-	0.1
Mínimo	58.2	-	13.27	3.43	3.03	49.0	-	-	-	24.7
Máximo	27.7	-	13.27	3.43	3.03	49.0	-	-	-	24.7

En el horizonte A se encontraron los más altos contenidos de M.O., con definida tendencia a incrementarse al aumentar la altitud. Esta tendencia, que se ve interrumpida en el perfil CR6 debido a que su horizonte superficial corresponde a una ceniza de muy reciente deposición, obedece al efecto de la baja temperatura sobre la actividad microbiológica y al alto contenido de Al extraíble.

El contenido de N total fue de 0.57% (0.02-1.78) y 0.20%(0.06-0.44) en los horizontes A y B respectivamente. De acuerdo con el nivel crítico establecido por Hardy (28), el contenido promedio de N total en el horizonte B lo iguala y en el horizonte A lo supera, excepto en el perfil CR6 por la razón ya expuesta. En estos suelos también se observaron estrechamente asociados la M.O y el N total y de aquí que la variación observada por este último haya seguido la misma tendencia mostrada por la materia orgánica.

El contenido de óxidos libres de hierro fue de 2.4%(0.4-5.0) y de 3.5%(1.7-5.9) en los horizontes A y B respectivamente. El mayor contenido de Fe_2O_3 observado en el horizonte B, que sugiere un mayor grado de meteorización, es explicable ya que dos de los valores más altos corresponden a horizontes enterrados presumiblemente más viejos y en consecuencia más meteorizados.

El contenido de P disponible fue en general muy bajo, pues si exceptuamos el valor correspondiente al horizonte A del perfil CR6, dicho contenido varió de 0.2 a 4.9 ppm en el horizonte A y de 0.1 a 6.3 ppm en el horizonte B. El relativamente alto nivel encontrado en el horizonte A del perfil CR6, sugiere la posibilidad del efecto

residual de una fertilización fosfatada previa al muestreo, o bien, a la posible riqueza en apatito de la ceniza volcánica que es un mineral primario de fácil meteorización.

El contenido de Al extraíble fue de 6.4 meq.%(0.2-14.0) y 6.7 meq.%(0.4-13.1) en los horizontes A y B respectivamente, lo cual señala contenidos similares en ambos horizontes. En el horizonte A, los valores más altos se observaron en los perfiles localizados a mayor altitud, debido probablemente al efecto del también contenido de M.O y de una meteorización más avanzada.

El contenido de alofana fue más alto en el horizonte B, debido posiblemente a una mayor meteorización en el horizonte A, donde ya ha tomado lugar una mayor cristalización de la alofana. El contenido de este mineral amorfo en el horizonte A fue del 21.43%.

La CIC total fue de 39.3 meq.%(2.3-88.1) en el horizonte A y de 39.2 meq.%(27.7-58.2) en el horizonte B. La más amplia variación observada en el horizonte A, se debe a la baja CIC total observada en el horizonte A del perfil CR6, que como se anotó anteriormente, corresponde a ceniza volcánica muy reciente.

En correspondencia con el grado más avanzado de meteorización y la riqueza en materia orgánica, la CIC total de estos suelos resultó ser alta, especialmente en los suelos localizados a mayor elevación, donde el contenido de M.O fue particularmente más alto.

El contenido de calcio cambiante fue de 5.43 meq.%(0.43-18.01) y 3.86 meq.%(0.24-13.27) en los horizontes A y B respectivamente. El contenido de magnesio cambiante fue de 1.35 meq.%(0.14-3.10) en

el horizonte A y de 1.16 meq.% (0.09-3.43) en el horizonte B. El contenido de potasio cambiante fue de 1.93 meq.%(0.18-3.58) y 1.68 meq.% (0.43-3.03) en los horizontes A y B respectivamente.

Estos valores revelan bajos contenidos de Ca y Mg y altos contenidos de K; sin embargo, es fácil advertir (cuadro 31) que en algunos de los perfiles estudiados, los contenidos de estas bases divalentes superan el nivel crítico establecido por Hardy (28), así como algunos de los contenidos de K están por debajo de dicho nivel.

La relación entre las bases divalentes y la monovalente es en promedio bastante baja, tanto en el horizonte A(3.8) como en el B (4.9). Esta baja relación indica un balance inadecuado por los bajos contenidos de calcio y magnesio cambiables.

El porcentaje de saturación de bases fue bajo como consecuencia de la alta CIC total observada, tal como se muestra en el cuadro 31. En el horizonte A varió alrededor del 25.1%(3.0-59.0) y en el horizonte B alrededor del 18.7%(2.0-49.0). Los más altos valores correspondieron a suelos de perfiles localizados a menor elevación, en correspondencia con los más bajos valores de CIC total y los más altos contenidos de calcio cambiante.

4.2.5 Comparación de las propiedades entre países

El cuadro 32, donde se presenta el resumen de los resultados obtenidos en la caracterización de los suelos correspondientes a Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica, ofrece una visión de conjunto que permite comparar en promedio, las principales propiedades físicas y químicas encontradas en los suelos de cada uno de los países

Cuadro 32. Promedios de las principales características en el horizonte A de los suelos de cuatro países de América Central.

	Guatemala	El Salvador	Nicaragua	Costa Rica
Color en seco*	10 YR 4/3	10 YR 4/2	10 YR 4/2	10 YR 4/3
Color en húmedo*	10 YR 2,5/3	10 YR 2/1,5	5 YR 2/1,5	10 YR 2/1,5
Limo + Arcilla (%)	50,5	60,6	62,3	68,1
Textura*	Media-Gruesa	Media	Media	Media-Fina
pH (H ₂ O)	6,2	6,4	6,8	5,7
Materia Orgánica (%)	10,84	5,75	6,04	13,96
Nitrógeno Total (%)	0,49	0,23	0,23	0,57
Fe ₂ O ₃ (%)	1,9	1,5	3,1	2,4
P disponible (ppm)	3,7	11,8	2,2	3,4
Al extraíble (meq. %)	6,6	1,7	1,1	6,4
Alofana** (%)	43,98	17,51	13,42	21,43
CIC Total (meq. %)	35,9	24,7	38,0	39,3
Ca cambiable (meq. %)	8,22	10,97	17,30	5,43
Mg cambiable (meq. %)	1,45	1,97	4,76	1,35
K cambiable (meq. %)	0,89	1,56	3,16	1,93
Sat. de Bases (%)	37,7	60,8	66,0	25,1
Ca + Mg/K	16,8	9,6	7,8	3,8

* Se anota la mayor frecuencia observada.

** Corresponden a determinaciones hechas en un perfil por cada país, de acuerdo a los resultados presentados en el cuadro 19.

mencionados. Del análisis comparativo derivan las siguientes consideraciones:

1. A excepción de los suelos de Nicaragua, donde el color determinado en húmedo tendió a tonalidades rojizas por el mayor contenido de óxidos libres de hierro, en el resto de los países el color de los suelos predominante correspondió a un "hue" 10YR.
2. Aunque en general la textura predominante fue media, el porcentaje de limo + arcilla se encontró más bajo en los suelos de Guatemala y más alto en los suelos de Costa Rica. Los valores porcentuales de esta fracción sugieren que la textura varió de media-gruesa a media-fina al disminuir la latitud, debido posiblemente a la edad mayor del material parental en los suelos de los países situados más al sur y consecuentemente, a un grado más avanzado en los procesos de meteorización. Esto último parece confirmarlo el contenido más alto de Fe_2O_3 observado en los suelos de Nicaragua y Costa Rica.
3. En correspondencia con los más altos contenidos de Al extraíble y los más bajos niveles de bases cambiables observados en los suelos de Guatemala y Costa Rica, se encontró que los valores de pH más bajos corresponden a los suelos de estos dos países.
4. El contenido de M.O fue más alto en los suelos de Guatemala y Costa Rica, en correspondencia con los más altos contenidos de Al extraíble observados en los suelos de ambos países. La relación directa encontrada entre el contenido de M.O y Al extraíble y la altitud (cuadros 10 y 15), explica el porqué de este mayor

contenido de M.O y Al extraíble, pues las mayores elevaciones corresponden a sitios de muestreo localizados en Guatemala y Costa Rica (cuadro 2). El contenido de N total siguió un comportamiento similar.

5. Si se exceptúan los altos valores de P disponible encontrados en los perfiles ES1 y ES2, donde se presume el efecto residual de una fertilización fosfatada previa al muestreo (cuadro 24), el contenido de este nutrimento vegetal, fue bajo y similar en los suelos de todos los países.
6. El mayor contenido de alofana se encontró en los suelos de Guatemala y el menor en los suelos de Nicaragua. Esto parece estar relacionado con el grado de meteorización y hace suponer que la deposición de cenizas volcánicas ha sido más frecuente en el sector más septentrional del istmo.
7. La CIC total fue similar en los suelos de Guatemala, Nicaragua y Costa Rica y más baja en los suelos de El Salvador, debido al menor contenido de M.O y alofana en estos últimos. Como los suelos de Nicaragua también son bajos en M.O y alofana, la similitud de su CIC con la de los suelos de Guatemala y Costa Rica, deberá atribuirse entonces a un tipo de arcilla 2:1 de alta CIC.
8. El contenido de bases cambiables fue más alto en los suelos de Nicaragua y El Salvador, debido probablemente al efecto de una lixiviación menos intensa, pues corresponde a sitios donde la precipitación es más baja. A excepción de los suelos de Nicaragua, donde el contenido de Ca y Mg cambiables se encontró por encima del nivel

crítico establecido por Hardy (28), en los suelos de los otros países el contenido de estos cationes divalentes fue bajo. Por el contrario, el contenido de K cambiabile fue alto en todos los suelos estudiados. Debido a los altos niveles de K cambiabile, el balance entre las bases divalentes y la monovalente representada por la relación $\text{Ca} + \text{Mg}/\text{K}$, resultó inadecuada en los suelos de to dos los países.

9. El porcentaje de saturación de bases fue mediano en los suelos de El Salvador y Nicaragua y bajo en los suelos de Guatemala y Costa Rica. En el caso de los suelos de Guatemala y Costa Rica, se justifica por la alta CIC total, en los de El Salvador por la baja CIC total y en los de Nicaragua por el alto contenido de bases cambiables.

5. RESUMEN Y CONCLUSIONES

Se presentan los resultados obtenidos en el estudio para la caracterización de 39 suelos derivados de cenizas volcánicas del istmo centroamericano.

Estos resultados comprenden información sobre las principales características de los sitios de muestreo y sobre las más importantes propiedades físicas y químicas de 60 horizontes A, 23 horizontes B y 11 horizontes C correspondientes a los 39 perfiles muestreados. Las características de los sitios de muestro fueron altitud, temperatura, precipitación, meses secos, declive, formación vegetal, uso potencial y material parental. Entre las principales propiedades físicas y químicas se consideraron la profundidad de los horizontes, color, textura, pH, contenido de materia orgánica, nitrógeno total, óxidos libres de hierro, fósforo disponible, Al extraíble, a lofana, calcio, magnesio y potasio cambiables, capacidad de intercambio catiónico total y de la fracción mineral, saturación de bases y las relaciones C/N, Ca/Mg, Ca/K, Mg/K y $\frac{Ca + Mg}{K}$.

Un análisis estadístico que hizo posible cuantificar la variabilidad de cada una de las propiedades determinadas y establecer el grado de asociación entre sí y con respecto a las características del sitio de muestreo, sirvió de base para la discusión e interpretación de los resultados obtenidos.

De esta manera el estudio realizado permitió establecer:

1. De los 39 perfiles estudiados, 17 fueron localizados en una zona ecológica de bosque premontano, entre 600 y 1800 metros de altitud, con una pendiente promedio del 4.3%, una precipitación

media anual de 1100 a 2730 mm y una temperatura media anual comprendida entre 16.8 y 21.6°C; 13 fueron localizados en una zona ecológica de bosque tropical, entre 60 y 500 metros de altitud, una pendiente promedio del 2.5%, una precipitación media anual de 1620 a 3040 mm y una temperatura media anual entre 24.7 y 25.5°C; y nueve fueron localizados en una zona ecológica de bosque montano, entre 1400 y 3000 m de altitud, con una pendiente promedio del 8.5%, una precipitación media anual de 2100 a 3000 mm y una temperatura media anual entre 9.6 y 19.0°C.

2. En correspondencia con la pendiente y la altitud, la clasificación de uso potencial de la tierra (46), va de IA y IP en áreas de menor pendiente a elevaciones bajas y IIA y IIP en las áreas de pendiente moderada a elevaciones medias, a IIIPi y IIID en las áreas de topografía escarpada a la mayor elevación.

3. Se encontró una estrecha relación entre la altitud, la temperatura, la precipitación, la formación vegetal y el declive, en el sentido de que al aumentar la altitud, disminuye la temperatura, aumenta la precipitación, la formación vegetal va de bosque tropical a bosque montano y el declive se hace más pronunciado. También se encontró que la formación vegetal, como representativa de las condiciones climáticas y topográficas existentes en el área bajo estudio, está relacionada con algunas propiedades del suelo. Así se encontró que a medida que la formación va de bosque tropical a bosque montano, al aumentar la altitud, la precipitación y el declive y disminuir la temperatura, disminuyen el pH, el contenido de Ca y Mg cambiables y el porcentaje de saturación de bases y au-

mentan los contenidos de M. O., N total y Al extraíble y la CIC total.

Esto sugiere la posibilidad de estudiar estos suelos de acuerdo con el tipo de formación vegetal en que se localicen.

4. Se encontró que el material parental de los suelos estudiados corresponde a ceniza volcánica blanca de tipo pumiceo en 22 perfiles, a ceniza volcánica gris en 11 perfiles, a escoria máfica en cuatro perfiles, a lahar pedregoso en un perfil y a aluvión piroclástico en un perfil. Sin embargo, para una mejor caracterización, se sugiere la conveniencia de llevar a cabo análisis petrográficos y mineralógicos.

5. Con respecto a la morfología de los perfiles estudiados se encontró que 17 fueron del tipo A(B)C, 16 del tipo de perfil enterrado, tres del tipo ABC y tres del tipo AC.

El espesor del horizonte A varió de 15 a 200 cm y el del horizonte B de 20 a 110 cm; el horizonte C se localizó desde 15 hasta 300 cm.

En general se trata pues, de suelos de desarrollo variable y profundos, pero con espesor también variable debido al efecto de las deposiciones periódicas y recientes de cenizas volcánicas.

El color en seco fue principalmente de un "hue" 10YR con "values" de 3 a 5 en el horizonte A, de 4 a 6 en el horizonte B y de 4 a 8 en el horizonte C, y con "chromas" de 1 a 4 en el horizonte A, de 3 a 6 en el horizonte B y de 1 a 3 en el horizonte C. En húmedo, el "hue", el "value" y la "chroma" tendieron a ser más bajos, y en ambos casos, el color se hizo más claro al aumentar la profun-

didad, excepto al alcanzar el horizonte C cuando el material parental era escoria máfica, lahar o aluvi6n piroclástico de color gris oscuro o negro.

Se encontró pues, al igual que la descripci6n hecha por Wright (67) y Swindale (55), horizontes A oscuros que variaron de pardo a pardo grisáceo oscuro y horizontes B y C pardo amarillentos y pardo rojizos.

Se encontró además, que la expresi6n del color fue afectada significativamente por el contenido de materia orgánica y de Fe_2O_3 , haciéndolo más oscuro y/o más rojizo a medida que aumenta su contenido respectivamente.

La textura media fue predominante en todos los suelos y a través de todo el perfil.

6. El pH determinado en $CaCl_2$ 0.01 M vari6 principalmente entre 5.1 y 6.0 y el determinado en H_2O entre 5.6 y 7.0 excepto en el horizonte C donde vari6 de 6.1 a 7.8. Aunque estrechamente relacionados, el pH en $CaCl_2$ 0.01 M fue siempre menor entre 0.5 y 1 unidad de pH que el determinado en H_2O . La estrecha relaci6n encontrada sugiere la posibilidad de que sean usadas indistintamente cualesquiera de las dos modalidades, pero teniendo presente que el pH en H_2O es más alto.

Se encontró que en los horizontes superiores el pH tiende a bajar a medida que aumentan la altitud, la precipitaci6n, el contenido de M. O. y de Al extraíble y disminuyen la temperatura, la profundidad, el contenido de Ca y Mg cambiables y el porcentaje de saturaci6n de bases.

7. El contenido de materia orgánica es alto y comparable con el encontrado por otros investigadores (1, 34, 67). Este alto contenido de M. O. parece tener la misma explicación dada por investigadores japoneses (34) quienes lo atribuyen al Al activo presente, pues al correlacionar la materia orgánica y el Al extraíble se encontró que están estrechamente relacionados. Por otro lado se encontró que la M. O. tiende a incrementarse al aumentar la altitud y la precipitación y disminuir la temperatura, tal como lo hace el Al extraíble.

La materia orgánica está estrechamente relacionada con el contenido de nitrógeno total, posiblemente debido a que la mineralización del N es limitada a través del perfil como consecuencia de la gran estabilidad de la materia orgánica.

La materia orgánica ejerce gran influencia sobre la CIC total, especialmente en el horizonte A, tendiendo a aumentarla al incrementarse su contenido. Como consecuencia también afecta al porcentaje de saturación de bases, pues este tiende a disminuir al aumentar el contenido de materia orgánica y la CIC total.

8. El contenido de nitrógeno total es alto y comparable con los valores encontrados en andosoles de México (1), pero posiblemente con disponibilidad limitada por la alta estabilidad de la materia orgánica y la facilidad de pérdidas por lixiviación. Como la M. O., el N total tiende a bajar su contenido al aumentar la profundidad en el perfil.

La relación C/N es alta al igual que la encontrada en suelos de Japón (6) y de Nueva Zelandia (58), debido a la estabilidad de

la materia orgánica y a la falta de mecanismos que retengan el N mineralizado (6, 36, 58), favorecida por la alta lixiviación en un medio lluvioso y de gran permeabilidad.

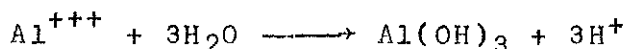
La falta de correlación entre la relación C/N y los contenidos de materia orgánica y de N total, sugiere que aquella es independiente de éstos.

La relación C/N tiende a bajar entre los horizontes A y C, pero con un incremento pronunciado en el horizonte B donde las causas de la alta C/N quizá son más efectivas.

9. El contenido de Fe_2O_3 es muy bajo comparado con los suelos de Hawaii (24, 56), pero similar al de los suelos de Oregon y California (24), posiblemente debido a que los suelos de Hawaii son más meteorizados.

10. El contenido de fósforo disponible es muy bajo debido a la gran capacidad de fijación de fosfatos de estos suelos. Estos fosfatos son posiblemente de Fe y Al, puesto que al correlacionar el P disponible con el contenido de Fe_2O_3 y de Al extraíble, se encontró que aquel tiende a bajar al aumentar el contenido de éstos.

11. Se encontró una correlación negativa con significancia estadística al 5% de probabilidad, entre el contenido de Al extraíble y el pH en el horizonte A, como la encontrada por Popenoe (47) en suelos de Guatemala entre el pH y el Al cambiante. Esta tendencia del pH a bajar al aumentar el contenido de Al extraíble la explica la presencia de iones de aluminio (Al cambiante), los cuales al hidrolizarse liberan iones H^+ que incrementan la acidez. La hidrólisis podría llevarse a cabo como lo indica la ecuación (11):



12. La CIC total fue en general moderada. Tendió a incrementarse al aumentar la altitud y la precipitación y disminuir la temperatura, asociado con el aumento del contenido de materia orgánica y de Al extraíble. También mostró tendencia a aumentar al disminuir la profundidad y el porcentaje de la fracción arena y aumentar el contenido de óxidos libres de hierro.

La CIC dependió del contenido de materia orgánica en un 53.1% en el horizonte A, en un 19.3% en el horizonte B y en un 5.6% en el horizonte C.

La estrecha relación encontrada entre la CIC (total y de la fracción mineral) y las fracciones minerales del suelo, en el sentido de que se incrementan aquellas a medida que baja el porcentaje de la fracción arena y aumenta el de las fracciones de limo y limo + arcilla independientemente de la fracción arcilla, permite inferir que hay actividad de cambio en la fracción limo y que la fracción limo + arcilla, es un criterio aceptable para señalar la fracción activa de estos suelos.

13. En las bases cambiables se encontró que únicamente el contenido de potasio cambiabile es alto, pues el contenido de Ca y Mg cambiables están por debajo de los patrones de adecuancia señalados por Hardy (28). Estos bajos niveles de calcio y magnesio cambiables y el alto contenido de K cambiabile hacen que tampoco el balance entre las bases sea adecuado.

Las bases cambiables mostraron tendencia a incrementarse al subir la temperatura y bajar la altitud, la precipitación y el por-

centaje de la fracción arena, como reflejo de un mayor grado de meteorización y de una lixiviación menos intensa.

14. El porcentaje de saturación de bases fue medio en los horizontes A y B y alto en el horizonte C.

Tendió a ser mayor al aumentar la profundidad en el perfil y el contenido de bases cambiabiles y disminuir la CIC y el contenido de materia orgánica, Fe_2O_3 , Al extraíble y alofana, en asociación con la disminución de la altitud y la precipitación y el aumento de la temperatura.

Se relacionó estrechamente con el pH, tendiendo a ser mayor a mayor pH. Esta tendencia confirma la consideración hecha anteriormente de que en estos suelos las cargas dependientes del pH no afectaron la CIC total y consecuentemente, que por lo menos en la mitad de los suelos considerados ($r^2 = 0.55$) los requerimientos de cal que se estimen en base al pH y al porcentaje de saturación de bases se ajustará a la realidad.

15. El contenido de alofana determinado reveló una amplia variabilidad dentro de niveles que pueden ser considerados como de medianos a bajos, pero relativamente altos, mayores del 50%, si fueran expresados como porcentaje de la fracción activa del suelo. Esta variabilidad posiblemente es debida a diferencias en el material parental y en el grado de meteorización del vidrio volcánico.

Como se trata del mineral secundario más importante de la fracción activa de estos suelos, sería conveniente llevar a cabo análisis mineralógicos y determinaciones del valor "delta" más exhaustivos para lograr una caracterización más completa.

16. Todas las propiedades consideradas se ubican, en la mayoría de los suelos, dentro del marco que caracteriza a los andosoles. Sin embargo, para su clasificación definitiva, es menester que se consideren adicionalmente otros criterios, tales como la densidad aparente, consistencia, capacidad de retención de humedad, porosidad, relación sílice/alúmina y análisis mineralógico, luego de una descripción más detallada de los perfiles.

SUMMARY AND CONCLUSIONS

The results obtained in the characterization of 39 soils derived from volcanic ash of the Central American isthmus are presented.

These results contain information on the principal characteristics of the sampling sites and on the most important physical and chemical properties of 60 A-horizons, 23 B-horizons and 11 C-horizons corresponding to the 39 profiles sampled. The characteristics of the sampling sites were: altitude, temperature, rainfall, dry months, slope, vegetation, potential use and parental material. Among the chief physical and chemical properties are considered depth of horizons, color, texture, pH, organic matter content, total nitrogen, free iron oxides, available phosphorus, extractable Al, allophane, exchangeable calcium, magnesium and potassium, total and mineral fraction cationic exchange capacity, base saturation and the relations C/N, Ca/Mg, Ca/K, Mg/K, and $\frac{Ca+Mg}{K}$.

The statistical analysis which made it possible to quantify the variability of each one of the determined properties and to establish a grade of association among them and with respect to the characteristics of the sampling site, served as base for the discussion and interpretation of the results obtained.

In summary it may be concluded that:

1. Of the 39 profiles studied, 17 were located in an ecological zone of premountain forest, at an elevation between 600 and 1800 meters, with an average slope of 4.3%, mean annual rainfall of 1100 to 2730 mm and mean annual temperature oscillating between 16.8

and 21.6°C; 13 were located in a tropical forest, at an elevation between 60 and 500 meters, an average slope of 2.5%, a mean annual rainfall of 1620 to 3040 mm and mean annual temperature between 24.7 and 35.5°C; and nine were located in a mountain forest, at an altitude between 1400 and 3000 m, with an average slope of 8.5%, mean annual rainfall of 2100 to 3000 mm and mean annual temperature between 9.6 and 19.0°C.

2. According to the slope and the altitude, the classification of the potential use of the land (46), goes from IA and IP in the areas of lower slope at low elevations and from IIA and IIP in the areas of moderate slope at medium elevations, to IIIPi and IIID in the areas of steep topography at greater elevations.

3. A close relation was found between altitude, temperature, rainfall, vegetation and slope, in the sense that on increasing the altitude the temperature decreases, the rainfall increases, the vegetation goes from tropical forest to mountain forest and the slope becomes steeper. It was also found that the vegetation, as an expression of the existing climatic topographic conditions of the area under study, is related to some soil properties. Thus it was found that as the vegetation goes from tropical forest to mountain forest, the pH, content of exchangeable Ca and Mg, and percentage base saturation decrease and the O. M., total N, extractable Al and the total CEC increase.

This suggests the possibility of studying these soils according to the type of vegetation where they are located.

4. It was found that the parental material of the soils studied corresponds to white volcanic ash of the pumiceous type in 22 profiles, to grey volcanic ash in 11 profiles, to mafic scoria in 4 profiles, to rocky lahar in one profile and to pyroclastic alluvion in one profile. However, for a better characterization it is necessary to carry out petrographic and mineralogic analyses.

5. With respect to the morphology of the profiles studied it was found that 17 were of the A(B)C type, 16 of the buried profile type, three to the ABC type and three of the AC type.

The thickness of the A horizon varied from 15 to 200 cm, that of the B horizon from 20 to 110 cm; and that of the C horizon from 15 to 300 cm.

In general, it is dealt with soils of different degree of development and depth; however, the thickness was also due to the effect of the periodic and recent depositions of volcanic ashes.

The dry color was mainly a hue 10YR with values 3 to 5 in the A horizon, from 4 to 6 in the B horizon and from 4 to 8 in the C horizon, the chromas varied from 1 to 4 in the A horizon, from 3 to 6 in the B horizon and from 1 to 3 in the C horizon. When the color was determined in wet, the hue, value and chroma tended to be lower. The color was lighter with the increase of depth, except upon reaching the C horizon when the parental material was mafic scoria, lahar or pyroclastic alluvion of dark grey or black color.

It was also found that the color was affected significantly by the organic matter and Fe_2O_3 content, making it darker or redder

according to the increase of its content, respectively.

Medium texture was predominant in all soils and through all the profiles.

6. pH determined in CaCl_2 0.01 M varied mainly between 5.1 and 6.0 and the one determined in H_2O between 5.6 and 7.0 except in the C horizon where it varied from 6.1 to 7.8. Even though both measurements were closely related, the pH in CaCl_2 0.01 M was always lower by 0.5 to 1 unit of pH than the one determined in H_2O . The close relation found suggests the possibility of using either of the two methods.

7. The organic matter content was high and comparable with the levels found by other investigators (1, 34, 67). This high O. M. content seems to have the same explanation given by the Japanese investigators (34) who attributed it to the active Al present. Organic matter and extractable Al gave highly significant correlations. It was also found that both O. M. and extractable Al tend to increment as the altitude and rainfall increase and the temperature decreases.

Organic matter was closely related with total N, possibly due to the fact that the N mineralization is limited through the profile as consequence of the great stability of the organic matter.

Organic matter exercises great influence over the total CEC, especially in the A horizon. As a consequence it also affects the base saturation percentage, as it tends to decrease when the O. M. and total CEC increase.

8. The total nitrogen content was high and comparable with the values found in Mexican andosols (1). However, its availability is limited due to the high organic matter stability. Like O. M., total N tends to decrease on increasing the profile depth.

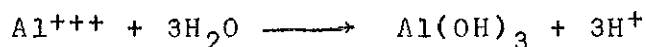
The C/N ratio was high and similar to those found in Japanese (6) and New Zealandese (58) soils, due to the organic matter stability and to the lack of mechanisms to retain mineralized N (6, 36, 58).

The C/N ratio increased with depth to the B horizons but decreased in the C horizon.

9. The content of Fe_2O_3 was very low compared with the soils of Hawaii (24, 56), but similar to that of the soils from Oregon and California (24), possibly due to the fact that Hawaiian soils are more highly weathered.

10. The content of available phosphorus was very low due to the great phosphate fixation capacity of these soils. These were mostly phosphates of Fe and Al. Available P and the contents of Fe and Al gave highly significant negative correlations.

11. A negative correlation at the 5% level was found. Popenoe (47) found a similar correlation in Guatemalan soils. This tendency of pH to decrease when the extractable Al increases is explained by the liberation of hydrogen ions upon hydrolysis of aluminum, as shown in the equation (11):



12. Total CEC was in general medium. It tended to increase with an increase in altitude and rainfall and a decrease in temperature

associated with an increase in the organic matter and extractable Al contents.

The organic matter contributed to the soil CEC in a 53.1% in the A horizon, in a 19.3% in the B horizon and in a 5.6% in the C horizon.

The close relation found between the CEC (total and mineral fraction) and the content of silt plus clay in the soil suggests that there is exchange activity in the silt fraction and that the sum of the percentages of silt and clay corresponds to some extent to the active fraction of these soils.

13. In relation to the exchangeable bases it was found that only the exchangeable potassium content was high. The contents of exchangeable Ca and Mg were lower than the critical values pointed out by Hardy (28). These low levels of exchangeable calcium and magnesium also resulted in inadequate rations between divalent and monovalent cations.

The exchangeable bases showed a tendency to increase with an increase of temperature and clay content and a decrease of altitude and rainfall as a reflection of the degree of weathering and leaching.

14. The percent base saturation was medium in the A and B horizons and high in the C horizon. The high base saturation in the C horizon was due to the low cation exchange capacity and not to an increase in base concentration.

15. The allophane content determined revealed an ample variability but it was generally greater than 50%, if expressed as percentage

of the active soil fraction. This variability was mainly due to differences in the parental material and in the degree of weathering of the volcanic glass.

16. All the properties considered fitted within the definition of andosols. However, for their definite classification, a more detailed study is necessary, including other properties such as bulk density, consistency, moisture retention, porosity, silica/alumina ratios, and mineralogical analysis. A more detailed description of the profiles is also imperative.

7. LITERATURA CITADA

1. AGUILERA H, N. Suelos de ando; génesis, morfología y clasificación. Chapingo, Mexico, Escuela Nacional de Agricultura. Serie de Investigación No.6. 1965. 12p.
2. ALCAYAGA, A. Relaciones entre algunas características químicas y físicas de suelos derivados de cenizas volcánicas. Agricultura Técnica (Chile) 25:9-18. 1965.
3. BABBAR, M. N. Desarrollo agropecuario en el Mercado Común Centroamericano. Guatemala, C.A., SIECA/RMA-I/DTI, 1964. 35 p. (Mimeografiado)
4. BALERDI, F., MULLER, L., y FASSBENDER, H. W. Estudios de fósforo en suelos de América Central. III. Comparación de cinco métodos químicos en análisis de fósforo disponible. Turrialba (Costa Rica) 18(4):384-360. 1968.
5. BESOAIN, E. Volcanic ash soils of Chile. In FAO Report No.14, on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.92-93.
6. BIRRELL, K.S. Some properties of volcanic ash soils. In FAO Report No.14, on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.74-81
7. BORNEMISZA, E. e IGUE, K. Oxidos libres de hierro y aluminio en suelos tropicales. Turrialba, Costa Rica 17(1):23-30. 1967.
8. BOWER, C. A. et al. Exchangeable cation analysis of saline and alkaline soils. Soil Science 73:251-261. 1952.
9. BRAY, R. H. y KURTZ, L. T. Determination of total, organic and available forms of phosphorous in soils. Soil Science 59: 39-45. 1945.
10. BREMNER, J. M. Total Nitrogen. In Black, C. A. et al. Ed. Methods of soil analysis. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp.1149-1178.
11. BUCKMAN, H. O. and BRADY, N. C. The nature and properties of soils. 6th Ed. New York, Macmillan, 1960. 567p.
12. CLINE, M. G. Methods of collecting and preparing soil samples. Soil Science 59:3-5. 1945.
13. DAY, R. P. Particle fractionation and particle size analysis. In Black, C.A. et al. Ed. Methods of soil analysis. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp.545-567.

14. DETORO y GISBERT, M. Pequeño Larousse, Ilustrado. Paris, Larousse, 1964. 1663p.
15. DIAZ ROMEU, R. y BALERDI, F. Determinación de la capacidad de intercambio de cationes del suelo. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1967. 3p. (Mimeografiado)
16. DONDOLI, C. B. y TORRES, J. A. Estudio geoagronómico de la región oriental de la Meseta Central. San José, Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industrias, 1954. 175p.
17. DUDAL, R. Correlation of soils derived from volcanic ash. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.134-137.
18. _____ and SOEPRAPTOHARDJO, M. Some considerations on the genetic relationship between latosols and andosols in Java (Indonesia). Trans. 7th Congress Soil Science. Madison, Wis. 4:229-237. 1960.
19. EGAWA, T. Mineralogical properties of volcanic ash soils in Japan. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.89-93.
20. EL SALVADOR. Dirección General de Estadística y Censos. Diccionario Geográfico de El Salvador. San Salvador, 1959.
21. _____. Dirección General de Investigaciones Agronómicas. Resumen de las unidades de mapeo. Levantamiento general de suelos de la República de El Salvador. Ministerio de Agricultura y Ganadería. San Salvador, 1966. p.irr.
22. FASSBENDER, H. W., MULLER, L. y BALERDI, F. Estudio del fósforo en suelos de América Central. II. Formas y su relación con plantas. Turrialba (Costa Rica) 18(4):333-347. 1968.
23. FIELDS, M. and PERROT, K. W. The nature of allophane in soils. III. Rapid field and laboratory test for allophane. New Zealand Journal of Science 9(3):623-629. 1966.
24. FLACH, K. Genesis and morphology of ash-derived soils. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.111-114.
25. FOOD and AGRICULTURE ORGANIZATION. Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. 169p.
26. FORSYTHE, W. Progresos recientes en el análisis de las partículas de los suelos por medio del método del hidrómetro. Agronomía (Perú) 33:16-27. 1966.

27. GREWELING, T. and PEECH, M. Chemical soil tests. Cornell Agricultural Experiment Station. (Ithaca). Bulletin No.960, 1965. 59p.
28. HARDY, F. The soils of IAIAS area. Turrialba, Costa Rica, Cacao Center, IAIAS, 1961. 76p.(Mimeografiado)
29. HOFFSTETTER, R. et al. Lexique Stratigraphique International. V. Amérique Latine, 2a Amérique Centrale(8cartes). Paris, Centre National de la Recherche Scientifique, 1960. 366p.
30. HOLDRIDGE, L. R. Mapas ecológicos de Guatemala, El Salvador, Nicaragua y Costa Rica. San José, Costa Rica, IICA, 1959. s.p.
31. ISHIZAWA, S. Microbiology of volcanic ash soils in Japan. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.87-88.
32. JACKSON, M. L. Soil Chemical Analysis. New Jersey, Prentice-Hall, 1958. 498p.
33. _____. Free oxides, hydroxides and amorphous aluminosilicates. In Black C.A. et al. Ed. Methods of soil analysis. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp.578-603.
34. JAPAN. Ministry of Agriculture and Forestry. Volcanic ash soils in Japan. Tokyo, Sakurai-Kosaido, 1964. 211p.
35. KILMER, V. J. The estimation of free iron oxides in soils. Soil Science Society of America. Proc.24(5):420-21. 1960.
36. KOBO, K. Properties of volcanic ash soils. In FAO Report No. 14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.71-73.
37. MARIANO, J. A. Volcanic ash soils of the Philippines. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.53-55.
38. McLEAN, E. O. Aluminium. In Black C. A. et al. Edit. Methods of soil analysis. Wisconsin, American Society of Agronomy, 1965. pp.978-997.
39. MARTINI, J. A. Chemical, mineralogical and physical properties of seven surface soils from Panamá with special reference to cation exchange capacity and potassium status. Ph.D. Thesis. Ithaca, New York, Cornell University, 1966. 190p. (Mimeografiada).
40. _____. Principales grandes grupos de suelos de América Central y Mexico. Fitotecnia Lationamericana 4(1):57-79. 1967.

41. MARTINI, J. A. Algunas consideraciones sobre los suelos de Centroamérica con referencia especial al desarrollo del trópico húmedo. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1968. 4Op. (Mimeografiado)
42. MOSQUERA, L. Génesis y propiedades de los suelos de una secuencia topográfica en el trópico húmedo cálido. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1967. 141p. (Mimeografiada)
43. MULLER, L. et al. Estudio del fósforo en suelos de América Central. I. Ubicación, características físicas y químicas de los suelos estudiados. Turrialba(Costa Rica) 18(4): 319-332. 1968.
44. MUNSELL COLOR COMPANY. Munsell soil color charts. Baltimore, Maryland. 1954. 20p.
45. OHMASA, M. Scope of volcanic ash soil, their extent and distribution. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.7-8.
46. PLATH, C. V. y VAN DER SLUIS, A. J. Uso potencial de la tierra. VII. Istmo Centroamericano. FAO No. AT2234. 1964-1965. 30p.
47. POPENOE, H. Some soil cation relationship in an area of shifting cultivation in the humid tropics. International Congress of Soil Science, 7th. Madison, Wisconsin. 2:303-312. 1960.
48. RICO, M. Report on soils of volcanic ash origin in El Salvador. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.23-29.
49. SAIZ DEL RIO, J. F. y BORNEMISZA, E. Análisis químico de suelos; métodos de laboratorio para diagnosis de fertilidad. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1961. 107p.
50. SCHOFIELD, R,K, y TAYLOR, A. W. The measurement of soil pH. Soil Science Society of America. Proc. 19:164-167. 1953.
51. SIMMONS, C. S. Geografía de los suelos de Guatemala. In Asamblea Latinoamericana de la Ciencia del Suelo, Mexico, 1955. Secretaría de Agricultura y Ganadería, Mexico. Folleto misceláneo No.5. 1955. pp.39-53.
52. SIMMONS, C. S., TARANO, J. M. y PINTO, J. H. Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala. Guatemala, Instituto Agropecuario Nacional, 1959. 1000p.
53. SOTO, M. y GONZALEZ, R. Estudio geoquímico y geoagronómico de dos suelos de Costa Rica. Tesis Ing. Agr. San José, Costa Rica, Universidad de Costa Rica, 1956. 124p.

54. SUAREZ H, A. Caracterización del estado del potasio en tres grandes grupos de suelos de Costa Rica. Tesis Mag. Sc. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1968. 305p.
55. SWINDALE, L. D. The properties of soils derived from volcanic ash. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.82-86.
56. _____, and SHERMAN, D. Hawaiian soils from volcanic ash. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.36-49.
57. TAN, K. H. The andosols in Indonesia. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.30-35.
58. TAYLOR, N. The classification of ash-derived soils in New Zealand. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.101-110.
59. THORNBURY, W. D. Principios de geomorfología. 2a. ed. Buenos Aires, Kapelusz, 1966. 643p.
60. TROJER, H. y JARAMILLO, L. R. Mapa climatológico de América Central. Proyecto IICA.SIECA. Turrialba, Costa Rica, IICA, 1969 (En Prensa).
61. UNION PANAMERICANA. Inventario de la información básica para la programación del desarrollo agrícola en la América Latina. Centroamérica. Washington D.C., 1965. 186p.
62. U.S. DEPARTMENT OF AGRICULTURE. Supplement to soil classification system (7th. Aproximation). Washington D.C., Soil Conservation Service, 1967. 207p.
63. VAN WAMBEKE, A. Proyecto de mapa de suelos de Centroamérica. Santiago, Chile, FAO/UNESCO, 1968. p.irr.
64. VARGAS, O. y TORRES, J. A. Estudio preliminar de suelos de la región occidental de la Meseta Central. Costa Rica, Ministerio de Agricultura e Industrias. Boletín Técnico No.22, 1968. 64p.
65. VENEMA, K. C. W. Some observations of yield depressions caused by normal fertilizer dressings. Potash and Tropical Agriculture. 3(3):39-52. 1960
66. WEYL, R. Die geologie Mittelamerikas. Berlin, Gebrüder Borntraeger, 1961. 226p.

67. WRIGTH, A. C. S. The andosols or humic allophane soils of South America. In FAO Report No.14 on Meeting on classification and correlation of soils from volcanic ash. Tokyo, 1964. pp.9-22.
68. YAMANAKA, K. Physics properties. In Japan. Ministry of Agriculture and Forestry. Volcanic ash soil in Japan. Tokyo, Sukarai-Kosaido, 1964. pp.69-91.